

Trabalho de Conclusão de Curso

Desenvolvimento de um biodigestor
residencial para processamento de
resíduos sólidos orgânicos

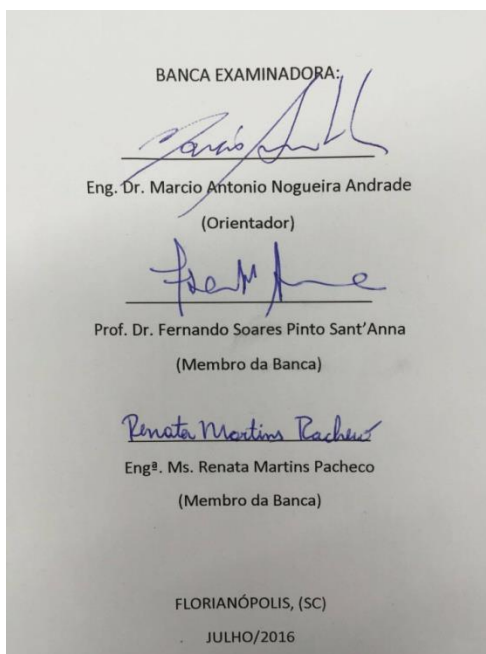
Mariane Scheffer Nazaro

Mariane Scheffer Nazaro

*Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para
obtenção do Título de Engenheiro Sanitarista e Ambiental e
aprovado pela banca examinadora.*

Florianópolis, 14 de Julho de 2016.

Banca Examinadora:



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

**DESENVOLVIMENTO DE UM BIODIGESTOR
RESIDENCIAL PARA PROCESSAMENTO
DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS**

MARIANE SCHEFFER NAZARO

Trabalho submetido à Banca Examinadora
como parte dos requisitos para Conclusão
do Curso de Engenharia Sanitária e
Ambiental.

BANCA EXAMINADORA

**Eng. Dr. Marcio Antonio Andrade Nogueira
(Orientador)**

**Prof. Dr. Fernando Soares Pinto Sant'Anna
(Membro da Banca)**

**Eng^a. Ms. Renata Martins Pacheco
(Membro da Banca)**

**Florianópolis / SC
2016**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Scheffer Nazaro, Mariane
Desenvolvimento de um biodigestor residencial para
processamento de resíduos sólidos orgânicos / Mariane
Scheffer Nazaro ; orientador, Marcio Antonio Andrade
Nogueira - Florianópolis, SC, 2016.
103 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Biogás. 3.
Biodigestores. 4. Energia renovável. 5. Resíduos sólidos
orgânicos. I. Andrade Nogueira, Marcio Antonio . II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

“Hakuna Matata, é lindo dizer...”

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Marcio e Jaine, por sempre acreditarem em mim e me incentivarem em busca dos meus sonhos. Sem vocês eu nada seria.

Às minhas irmãs, Nine e Ari, parceiras da vida e grandes contribuidoras para esta conquista.

Ao meu orientador Marcio Andrade, por me apresentar o fantástico mundo dos biodigestores, pelos ensinamentos, compreensão, e pela paciência ao me passar seus conhecimentos.

Aos professores do Departamento de Eng. Sanitária e Ambiental e outros Departamentos da UFSC, pelos conhecimentos a mim transmitidos.

Aos amigos da 10.2 e demais colegas de curso, pela parceria durante esta caminhada e pelos momentos felizes de companheirismo.

A todos os amigos que, de alguma forma, estiveram presente durante esta jornada.

Muito Obrigada!

RESUMO

A digestão anaeróbia é um processo que pode ser utilizado para o tratamento de resíduos orgânicos, com a vantagem de poder transformar estes substratos em produtos aproveitáveis, como biogás e biofertilizante. O biogás é composto principalmente por metano e gás carbônico e possui grande aplicabilidade, seja para queima ou para geração de energia elétrica. Neste contexto, a digestão anaeróbia se mostra como uma alternativa promissora para o tratamento dos resíduos sólidos orgânicos, visto que a fração orgânica dos resíduos sólidos corresponde a mais de 50% do total dos resíduos domésticos gerados no Brasil. Tendo em vista esse panorama, o objetivo deste trabalho é propor um biodigestor para o processamento de resíduos sólidos orgânicos de sobras de alimentos, capaz de atender as necessidades de um condomínio com aproximadamente 100 moradores, localizado no município de Florianópolis, Santa Catarina. Para alcançar este objetivo, realizou-se uma revisão bibliográfica dos parâmetros intervenientes do processo e dos detalhes construtivos que afetam a eficiência dos biodigestores, assim como se fez um levantamento dos modelos de biodigestores residenciais existentes. A proposta deste biodigestor leva em consideração as informações levantadas nesta revisão, visando melhorar o equipamento de modo que ele seja eficiente, economicamente acessível e esteticamente atraente. Após a concepção do biodigestor, escolha dos materiais aplicados, tubulações utilizadas, e dimensionamento do biodigestor, foram levantados os quantitativos e os custos e elaborada uma planta 3D para melhor visualização do produto final. Faz-se, uma discussão acerca dos ganhos econômicos, sociais e ambientais da implantação deste empreendimento com o intuito de elucidar o alcance dos benefícios que este tipo de equipamento pode oferecer para o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos. De acordo com as estimativas realizadas para um condomínio com 100 moradores, correspondendo à produção diária de 96,12 kg de resíduos sólidos orgânicos, é possível gerar aproximadamente 9,61m³ de biogás por dia. Este potencial de produção de biogás corresponde ao equivalente energético de 4,32 m³ de GLP, sendo suficiente para manter 24 boca de fogão acesas por 3 horas por dia, ou ainda, manter 17 lâmparinas à biogás acesas 8 horas por dia.

Palavras-chave: Biogás, Biodigestores, Biomassa Residual, Energia Renovável, Resíduos Sólidos Orgânicos.

ABSTRACT

Anaerobic digestion is a process that can be used for the treatment of organic solid waste, which has the advantage of transforming this substrate into useful products such as biogas and fertilizer. The biogas is composed mainly by methane and carbon dioxide and has a wide applications, such as burning or electric energy generation. In this context, anaerobic digestion shows itself as a promising alternative organic waste treatment since the organic fraction in mass of the waste is around 50% in Brazil. Considering this panorama, the objective of this work is to propose a biodigester for organic solid waste processing which is able to meet the needs of a condominium with 100 residents, located in Florianópolis, Santa Catarina. To achieve this objective, a literature review of the parameters and construction details that affects the efficiency of biodigester was developed. After this, an analysis of the currently available residential biodigesters for low volumes was also developed. The proposal of this biodigester considered all the collected information in these review aiming to optimize the equipment, so that it would be efficient, affordable and aesthetically appealing. Furthermore, besides the biodigester conception, selection of material and pipes used and the dimensioning, its costs were estimated and a 3D plant was developed to allow better view of the final product. Ultimately, a discussion around the economic, social and environmental gain regards the implementation of this project was included in order to clarify the scope of the benefits that this type of equipment can offer to urban solid waste management. According to the estimates, a condominium with 100 residents generates 96,12 kg of organic solid waste per day. This amount is able to produce about 9,61 m³ of biogas per day. It is equivalent to the energy potential of 4,32 m³ of PLG gas. This volume is sufficient to keep 17 lamps alight during 8 hours or 24 cook stove during 3 hours per day.

Key-words: Biogas, Biodigesters, Residual Biomass, Renewable Energy, Organic Solid Waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia	12
Figura 2: Classificação dos reatores em função do escoamento hidráulico.....	18
Figura 3: Reator de batelada em sequência operacional.....	19
Figura 4: Representação do Biodigestor modelo Chinês (esquerda) e Biodigestor Modelo Indiano (direita).	23
Figura 5: Variações de temperatura do ambiente e do substrato ao longo de 1 ano	24
Figura 6: Detalhes do projeto de biodigestores Modelo Canadense que foram executados pelo Projeto Alto Uruguai.	28
Figura 7: Distritos Administrativos de Florianópolis.....	30
Figura 8: Composição Gravimétrica dos RSU do município de Florianópolis, 2002.....	31
Figura 9: Foto do biodigestor EUCOLino.....	38
Figura 10: Detalhamento do biodigestor EUCOLino.....	39
Figura 11: Detalhamento do biodigestor Mailhem Ikos Environmentent.....	40
Figura 12: Foto de divulgação do Biodigestor HomeBiogas	42
Figura 13: Detalhamento dos componentes integrantes do biodigestor HomeBiogas.....	43
Figura 14: Detalhamento Biodigestor Tubular Recolast (1- Tubulação de entrada; 2- Gasômetro; 3- Placas de PVC; 5 - Tela de Poliéster).....	44

Figura 15: Fogão tipo Cooktop a biogás.....	53
Figura 16: Lamparina com queimador a biogás.....	53
Figura 17: Triturador de Alimentos	55
Figura 18: Tensão em um vaso esférico de parede fina.....	56
Figura 19: Tensão em um vaso cilíndrico de parede fina	56
Figura 20: Parafusos e porcas que possuem proteção plástica contra intempéries.....	58
Figura 21: Hélice do sistema de agitação manual para fluxo axial	59
Figura 22: Mangueira Sanfonada em PVC para descarga de fundo.....	59
Figura 23: Tubulação de gás em PEAD, DN = 1"	60
Figura 24: Conexões para Tubulação de gás em PEAD, DN = 1"	61
Figura 25: Imagem rederizada do layout final do produto.....	47
Figura 26: Imagem renderizada do detalhamento interno do biodigestor	47
Figura 27: Layout final do biodigestor proposto	73
Figura 28: Vista Isométrica com detalhamento da membrana interna (1 – Câmara de entrada; 2 – Membrana externa; 3 – Câmara de gás; 4 – Câmara de digestão; 5 – Base de sustentação).....	74
Figura 29: Vista Lateral com detalhamento (1 – Tubulação de saída de gás; 2 – Tubulação de descarga de fundo câmara interna; 3 – Tubulação de descarga de fundo câmara externa; 4 – Tubulação de lixiviados).....	75

Figura 30: Vista Lateral com detalhamento (1 – Cuba de recebimento; 2 – Triturador)	76
Figura 31: Vista de Topo com detalhamento interno (1 – Agitador axial; 2 – Saída para descarga de fundo da câmara interna; 3 – Saída para descarga de fundo da câmara externa; 4 – Volante dos agitadores manuais).....	77
Figura 32: Vista Isométrica do biodigestor sem cobertura (1 - Fitas para retenção da câmara de gás)	78
Figura 33: Dimensões do biodigestor (A = 0,3m; B = 0,9m; C = 0,6m; D = 1,42m; E = 0,83m)	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Teor de sólidos totais, sólidos voláteis e relação Carbono:Nitrogênio (C:N) de resíduos orgânicos residenciais e comerciais.	32
Tabela 2: Compilação de modelos de biodigestores existentes, desenvolvidos para tratamento de pequenos volumes.....	37
Tabela 3: Consumo diário de biogás considerando os dois cenários propostos	54
Tabela 4: Orçamento parcial do biodigestor proposto.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

BRS – Bactérias Redutoras de Sulfato

CSTR - *Continuous Flow Stirred-Tank Reactor*

COMCAP – Companhia de Melhoramentos da Capital

C – Carbono

CH₄ – Metano

CO₂ – Dióxido de Carbono

EPDM – Etileno-Propileno-Dieno

GEE – Gases do Efeito Estufa

GIZ - *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

HP – Horse Power

H – Hidrogênio

Hz – Hertz

IBGE – Instituto Brasileiro de Pesquisa e Estatística

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

IPUF – Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis

K – Kelvin

MDL – Mecanismos de Desenvolvimento Limpo

MW – Megawatt

N – Nitrogênio

NCI – *National Biomass Cookstoves Initiative*

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PGRS – Plano de gerenciamento de Resíduos Sólidos

pH – Potencial Hidrogeniônico

PNRS – Política Nacional dos Resíduos Sólidos

PTFE – Politetrafluoretileno

PU – Poliuretano

PVC – Policloreto de Vinila

PROBIOGAS - Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil

RPM – Rotações Por Minuto

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná

ST – Sólidos Totais

SV – Sólidos Voláteis

TDH – Tempo de Detenção Hidráulica

UV – Ultra Violeta

W - Watts

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	4
2.1.	OBJETIVO GERAL	4
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
3.1.	RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL	5
3.2.	TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	6
3.2.1.	Aterro Sanitário	7
3.2.2.	Reciclagem	7
3.2.3.	Compostagem	8
3.3.	TRATAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS POR BIODIGESTORES	8
3.4.	O PROCESSO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA	10
3.5.	PRINCIPAIS FATORES INTERVENIENTES NOS PROCESSOS ANAERÓBIOS	14
3.5.1.	Temperatura	14
3.5.2.	pH ou Potencial Hidrogeniônico	15
3.5.3.	Tamanho das partículas	15
3.5.4.	Substâncias tóxicas	15
3.5.5.	Nutrientes	15
3.5.6.	Hidrodinâmica	16
3.5.7.	Tipo de Substrato	16
3.6.	REATORES ANAERÓBIOS	17
3.7.	BIODIGESTORES RESIDENCIAIS	21
3.7.1.	Biodigestor modelo chinês	23
3.7.2.	Biodigestor modelo indiano	25
3.7.3.	Biodigestor modelo tubular	25
4.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	29

4.1.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	29
4.1.1.	Composição gravimétrica dos RSU de Florianópolis	31
4.1.2.	Potencial energético dos resíduos sólidos de Florianópolis	31
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5.1.	PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA	34
5.2.	REVISÃO DOS MODELOS EXISTENTES	36
5.2.1.	EUColino by Bioferm Energy Systems	38
5.2.2.	Mailhem Ikos Environment	40
5.2.3.	HomeBiogas	41
5.2.4.	Biodigestor Tubular Recolast	44
5.3.	CONCEPÇÃO DO BIODIGESTOR RESIDENCIAL	46
5.4.	PROJETO 3D	46
5.5.	DIMENSIONAMENTO	47
5.6.	COMPONENTES DO BIODIGESTOR	54
5.6.1.	Câmara de entrada	54
5.6.2.	Triturador	55
5.6.3.	Câmara de Digestão	55
5.6.4.	Sistema de vedação	57
5.6.5.	Agitadores	58
5.6.6.	Descarga de Fundo	59
5.6.7.	Tubulações de gás	60
5.6.8.	Tubulação de Biofertilizante	61
5.6.9.	Alimentador de água	61
5.6.10.	Câmara de biogás	62
5.7.	TABELA DE PRODUTOS E ORÇAMENTO	63
5.8.	DISCUSSÃO SOBRE GANHOS E INVESTIMENTOS	64

6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
	REFERÊNCIAS	68
	ANEXO I –CONFIGURAÇÃO FINAL DO BIODIGESTOR PROPOSTO	73

1. INTRODUÇÃO

Com o processo de urbanização intensificam-se as relações sociais, mas também se agravam as desigualdades sociais. No dizer de Milton Santos (SANTOS 1999). “A cidade em si como relação social e como materialidade, torna-se criadora de pobreza, tanto pelo modelo socioeconômico de que é o suporte como por sua estrutura física.” Neste contexto, as relações do homem com o meio ambiente são predatórias e por vezes insustentáveis.

Na busca pelo desenvolvimento sustentável, da promoção de uma convivência menos predatória, da melhoria da qualidade de vida e da conservação ambiental, podemos desenvolver tecnologias que proporcionem o uso eficiente dos recursos naturais e a valorização dos resíduos.

Neste contexto, a geração cada vez maior dos resíduos sólidos urbanos, surge como uma das consequências de um modelo socioambiental do consumismo e do desperdício, cujos impactos podem ser mitigados com o aproveitamento energético do biogás gerado a partir do processamento anaeróbio dos resíduos sólidos orgânicos.

Segundo o último panorama realizado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza e Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) em 2014, o Brasil gera aproximadamente 78 milhões de toneladas de resíduos ao ano, o que equivale a aproximadamente a 387 quilos de resíduos sólidos por habitantes por ano.

De acordo com o diagnóstico do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos de Florianópolis – PGRS, realizado pela Companhia de Melhoramentos da Capital – COMCAP, 88,92% dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados na cidade é destinado diretamente para o aterro sanitário de Biguaçu. Isto significa que uma parcela muito pequena dos resíduos é reciclada, reutilizada ou direcionada para outras destinações que realizem algum tipo de aproveitamento deste material.

Planejar e aplicar o meio mais adequado de tratar e realizar a disposição final dos resíduos sólidos é uma necessidade e um desafio. Existem diversos fatores que interferem na seleção e na eficácia das tecnologias de manejo a serem adotadas, como: a composição dos resíduos, as características culturais e sociais da região e a disponibilidade de recursos financeiros.

Segundo Alburly et al. (2016) é necessário combinar de forma integrada as diferentes opções de destinação como (aterro, compostagem, reciclagem, incineração, biodigestão e outros) para que se possa gerir convenientemente um conjunto de resíduos diversificado em composição. Esta combinação deve ser escolhida de forma a minimizar os impactos ambientais, considerando também importantes questões administrativas, econômicas e sociais.

Considerando que a fração orgânica do total dos resíduos domésticos gerados no Brasil é superior a 50% (ABRELPE, 2014), o método de biodigestão anaeróbia descentralizada pode ser uma opção vantajosa para o processamento desta biomassa residual presente nos RSU.

Diante disso, este trabalho surgiu da necessidade de contribuir para solucionar a crescente problemática dos resíduos sólidos orgânicos que correspondem a uma parcela significativa dos resíduos sólidos domésticos e contam com poucas iniciativas de reaproveitamento. O trabalho também busca atender as exigências impostas pela Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. A Lei prevê a redução da geração de resíduos, o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos e, principalmente, a valoração dos resíduos, aproveitando seu valor econômico e energético.

Embora não seja uma tecnologia nova, a utilização de pequenos biodigestores não é muito difundida no Brasil. Com ampla aplicabilidade, esta tecnologia pode ser empregada para processamento de vários tipos de resíduos orgânicos: restos de culturas agrícolas, dejetos de animais, resíduos sólidos urbanos orgânicos entre outros.

Esta alternativa atende as necessidades do saneamento municipal tratando os resíduos localmente, evita impactos ambientais como emissões de gases de efeito estufa - GEE, poluição de águas subterrâneas e superficiais, possibilita o aproveitamento energético do biogás gerado e ainda a produção de biofertilizantes.

Neste contexto, este estudo tem como objetivo desenvolver uma proposta de biodigestor para tratamento dos resíduos sólidos orgânicos de um condomínio residencial, localizado no município de Florianópolis, Santa Catarina. O projeto do biodigestor proposto resultou de uma análise crítica dos aspectos positivos e negativos de biodigestores residenciais já existentes, adotando parâmetros de projeto que influenciam no desempenho deste biodigestor. Buscou-se

desenvolver um produto que seja esteticamente agradável, adequado às condições climáticas do local proposto e que se adapte melhor ao ambiente residencial, facilitando sua aceitação pelos usuários.

Este trabalho está estruturado em seis capítulos. O primeiro capítulo é dedicado à introdução, no segundo apresentam-se os objetivos gerais e específicos. O terceiro capítulo contém uma fundamentação teórica que contempla a atual situação dos RSU no Brasil, a via tecnológica do processamento dos resíduos sólidos orgânicos por meio da digestão anaeróbia e alguns modelos de biodigestores residenciais existentes. No quarto capítulo apresentam-se os procedimentos metodológicos utilizados para alcançar os objetivos propostos. O quinto capítulo apresenta os resultados e discussões e é dedicado ao desenvolvimento do trabalho, nele se apresenta os principais parâmetros de projeto adotados no dimensionamento do biodigestor residencial proposto. Este capítulo contém também uma estimativa de custos deste biodigestor e os benefícios econômicos e ambientais a serem alcançados, resultantes da implantação deste biodigestor. No sexto capítulo apresentam-se as considerações finais, contendo propostas de continuidade desta pesquisa e as conclusões do trabalho.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento do projeto de um biodigestor residencial para o processamento dos resíduos sólidos orgânicos, prioritariamente de resíduos de preparação e de sobras de alimentos, e que possibilite o aproveitamento energético do biogás gerado.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1) Dimensionar e propor o projeto de um biodigestor residencial para o processamento dos resíduos orgânicos gerados por 100 moradores de um condomínio residencial localizado no município de Florianópolis- SC. Este biodigestor deve contemplar o aproveitamento energético do biogás no condomínio.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL

A Lei nº 12.305/2010, baseada na norma técnica da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) de 1987 define resíduos sólidos como:

“Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível”.

Em contrapartida, o dicionário Aurélio define resíduo como:

1. Aquilo que resta.
2. O que fica das substâncias submetidas à ação de vários agentes físicos ou químicos.

Fica evidente o contraste entre as duas definições e se diferencia o termo “resíduo” do termo “lixo”. Enquanto o primeiro é definido por aquilo que resta de atividades humanas em sociedade, e possui valor agregado sendo passível de ser beneficiado, o segundo não possui nenhum tipo de valor, devendo ser imediatamente descartado.

O último panorama realizado pela ABRELPRE (2014) constatou que, a produção de resíduo no Brasil cresceu com um índice superior à taxa de crescimento populacional no ano de 2014. Em 2014, a geração de RSU chegou a 78,6 milhões de toneladas, valor 2,9% superior a 2013. Deste montante, aproximadamente 41% foram encaminhados a lixões e aterros controlados que não contam com nenhuma medida de proteção do meio ambiente e à saúde pública ou, simplesmente, não foram coletados. Mesmo os 59% dos resíduos restantes não possuem um destino final nobre. A maior parte é

encaminhada a aterros sanitários que não exploram o potencial energético ou matéria prima deste produto.

Visando mudar este cenário no âmbito local, e atender ao Plano Nacional de Resíduos Sólidos, Florianópolis aprovou leis municipais com metas para a redução da quantidade de resíduos sólidos enviados para o aterro sanitário de Biguaçu. Outras leis como a Lei Complementar Municipal nº 113 de 24 de abril de 2003, que dispõe sobre a forma de apresentação dos resíduos sólidos para a coleta, visam incluir os geradores na gestão dos RSU, responsabilizando-os pelos seus resíduos gerados. As exigências legais incluem local específico para apresentação do resíduo à coleta, padronização quanto à forma e cor das lixeiras, dimensionamento adequado dos depósitos, entre outros.

Essas iniciativas visam adequar o município ao Princípio da Responsabilidade Compartilhada, também definido pela Política Nacional dos Resíduos Sólidos brasileira. De acordo com este princípio, os geradores de resíduo têm obrigações definidas por Leis Federais, Estaduais e Municipais. As responsabilidades variam entre pequenos e grandes geradores e dependem do tipo de resíduo gerado. Barr (2003) afirma que os formuladores de políticas estão cada vez mais interessados nos meios de participação dos indivíduos como forma de mudar a sua realidade. Estratégias que incentivam comportamentos ambientalmente responsáveis (como economizar energia, conservação das águas e reduzir, reutilizar e reciclar os resíduos) são indispensáveis para o desenvolvimento sustentável.

3.2. TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Para prevenir e controlar impactos causados ao meio ambiente e à saúde humana, várias tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos são utilizadas. A escolha de uma tecnologia deve ser feita de maneira criteriosa, levando-se em consideração o tipo de resíduo a ser tratado, a segurança do processo, a mitigação de impactos ambientais e a valorização dos resíduos por meio da reciclagem, reutilização ou aproveitamento de subprodutos.

Apresentamos a seguir, algumas tecnologias de disposição final e de valorização mais utilizadas no Brasil.

3.2.1. Aterro Sanitário

O aterramento dos resíduos sólidos implica no seu confinamento no solo, objetivando o tratamento e/ou disposição final dos mesmos. É a maneira de destinação dos resíduos sólidos mais difundida no Brasil e de menor custo (CETESB, 1992). Independente da tecnologia de gestão dos resíduos sólidos escolhida, a técnica de aterramento pode ser sempre considerada, seja para dispor do volume de resíduos excedentes ou para dispor resíduos de outros tratamentos.

Para que seja eficiente, o aterro deve ser capaz de conter os poluentes, reduzindo os riscos à saúde pública e ao meio ambiente. Logo, só devem ser encaminhados ao aterro sanitário os resíduos que podem ser degradados no solo por processos físico-químicos.

Certos cuidados também devem ser tomados para que o aterramento dos resíduos seja feito de maneira correta. É importante realizar a impermeabilização da superfície, eliminando-se a infiltração de água pela precipitação ou resultantes da biodegradação do material para evitar contaminação dos mananciais pela percolação dos lixiviados. A operação dos aterros sanitários se restringe basicamente na cobertura dos resíduos, objetivando minimizar os riscos advindos da proliferação de vetores sanitários e carregamento do resíduo pelas águas pluviais. O lixiviado, que é a fração líquida do resíduo, deve ser coletado através de drenos e encaminhado a uma estação de tratamento para que possa ser disposto em um corpo hídrico.

3.2.2. Reciclagem

Reciclagem é o processo de coleta e processamento da parcela seca do resíduo que ainda possui algum tipo de valor agregado e, portanto, pode ser utilizado como matéria prima para outros produtos. Dentre os benefícios da reciclagem está a redução do volume de resíduo enviado aos aterros sanitários, conservação dos recursos naturais, economia de energia e redução das emissões de Gases de Efeito Estufa que contribuem para o aquecimento global.

No Brasil, 64,8% dos municípios possuem algum tipo de iniciativa de coleta seletiva (ABRELPE, 2014). Entretanto, a taxa efetiva de reciclagem é muito mais baixa. Em Florianópolis, a coleta seletiva corresponde a apenas 6,5% do total de resíduos coletados. Um percentual relativamente baixo quando considerado as metas estipuladas pela Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS).

A lei nº 12.305/2010 tornou obrigatória a implantação de sistemas de logística reversa, trazendo responsabilidades para os fabricantes de determinados produtos e setores nos quais o sistema deve ser disponibilizado. Setores bem estruturados no retorno dos materiais descartados como o das embalagens de agrotóxicos, embalagens de óleos lubrificantes e pneus mostram que o sistema de logística reversa é possível e pode ser um importante aliado para atingir as metas de reciclagem estabelecidas.

3.2.3. Compostagem

A compostagem é um método de degradação aeróbia que converte, por ação de microrganismos, a parcela orgânica dos resíduos residenciais, industriais ou agropecuários em fertilizantes. Assim como ocorre na reciclagem, a compostagem propicia um destino nobre para os resíduos orgânicos, evitando seu envio à aterros sanitários. Como resultado final deste processo, têm-se o composto orgânico que pode ser utilizado como adubo melhorando as características nutritivas do solo minorando os riscos ao meio ambiente.

Entre as vantagens na adoção da compostagem para o tratamento de resíduos orgânicos, pode-se citar a formação de húmus (adubo orgânico), redução do resíduo destinado ao aterro, reciclagem de nutrientes no solo, eliminação de patógenos durante o processo e economia no tratamento de efluentes. Por outro lado, o processo demanda grandes áreas para sua aplicação, tornando-se inviável para grandes volumes de resíduos.

3.3. TRATAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS POR BIODIGESTORES

A tecnologia de degradação da matéria orgânica dos resíduos por meio de digestão anaeróbia é amplamente divulgada e conhecida, seja para tratamento de resíduos urbanos, resíduos industriais ou da agroindústria. Dentre os benefícios deste tipo de tratamento está a produção de biogás, que possui potencial energético para a geração de energia elétrica e/ou calor, e também o fertilizante, uma vez que o método diminui a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) do efluente mas mantém os nutrientes como Nitrogênio (N) e Fósforo (P).

Ressalta-se aqui a contribuição que o Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no

Brasil, PROBIOGÁS, vem prestando ao desenvolvimento desta tecnologia no Brasil, incentivando a utilização da tecnologia dos biodigestores no setor do saneamento urbano, agropecuário e industrial. O programa PROBIOGÁS, desenvolvido pelo Ministério das Cidades, em parceria com a GIZ (*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*), visa inserir o biogás na matriz energética nacional e fomentar a indústria brasileira para o desenvolvimento nacional desta tecnologia. Para isso, o projeto capacita profissionais brasileiros em diversos níveis, contemplando atores que integram a cadeia de biogás, fortalecendo o mercado do biogás no Brasil.

Recentemente, uma parceria público-privada entre a Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR e a Catallini Bioenergia vem trazendo indicativos de como a exploração de resíduos pode ser uma atividade economicamente viável. A iniciativa tem como objetivo a exploração e destinação final adequada de resíduos sólidos orgânicos, produção de biogás, fertilizantes e geração de energia elétrica. Além disso, a proposta visa adequar a cidade de Curitiba aos princípios de importância da PNRS: não geração, redução de geração, reutilização, tratamento e disposição.

Este projeto prevê o tratamento por biodigestão anaeróbia do lodo gerado nas estações de tratamento de esgotos sanitários e, adicionalmente, dos compostos orgânicos de grandes geradores de resíduos como shoppings e restaurantes. O biogás gerado será utilizado para a geração de energia elétrica, e para isso, conta com uma usina com potência instalada de 2,8 MW.

É importante ressaltar que se justifica a implantação de plantas de biodigestores, mesmo quando não são economicamente vantajosas, pelos benefícios ambientais que elas podem proporcionar. Hoje, o tratamento de resíduos sólidos é garantido em Lei e o método de disposição final mais usual, aterramento sanitário, não é economicamente viável. Ou seja, investem-se recursos em uma tecnologia de disposição que não traz benefícios econômicos e gera grandes passivos ambientais. O tratamento de resíduos sólidos por biodigestão anaeróbia trata o resíduo, evita estes passivos ambientais e gera subprodutos valorizados.

A tecnologia dos biodigestores tem crescido nas últimas décadas não apenas para aplicações em biodigestores rurais, mas também para o tratamento de águas residuais domésticas e industriais, além do processamento de resíduos sólidos orgânicos. As aplicações

objetivando o tratamento de águas residuais devem-se principalmente ao favorável balanço energético apresentado por este processo em relação aos processos aeróbios convencionais de tratamento de resíduos orgânicos.

As principais vantagens da utilização de biorreatores anaeróbios para o processamento de biomassa são:

- a) Possibilidade de aproveitamento energético do gás metano como combustível, promovendo o uso local e a geração distribuída;
- b) Baixo consumo de energia necessário para operar o próprio processo;
- c) Possibilidade de aproveitamento dos efluentes dos biodigestores como biofertilizante;
- d) Diminuição das emissões de gases de efeito estufa, possibilitando a venda de créditos de carbono;
- e) Tratamento de resíduos, promovendo a diminuição da carga orgânica.

As principais desvantagens estão relacionadas à sensibilidade do processo a mudanças das condições ambientais.

3.4. O PROCESSO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia é um processo biológico natural que ocorre na ausência de oxigênio molecular, no qual populações bacterianas consorciadas interagem estritamente para promover complexas reações bioquímicas, sequenciais, que sob a ação de microrganismos decompõem a matéria orgânica, estabilizando-a por seus processos metabólicos, de fermentação e respiração. Deste processo de estabilização, e também de auto regulação de compostos orgânicos complexos como: carboidratos, proteínas e lipídeos, resultam produtos mais simples, principalmente os gases metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). O processo também libera pequenas quantidades de outros gases e gera uma pequena quantidade de lodo resultante de uma fração da matéria orgânica biodegradável, mas difícil degradação (MOSEY, 1983).

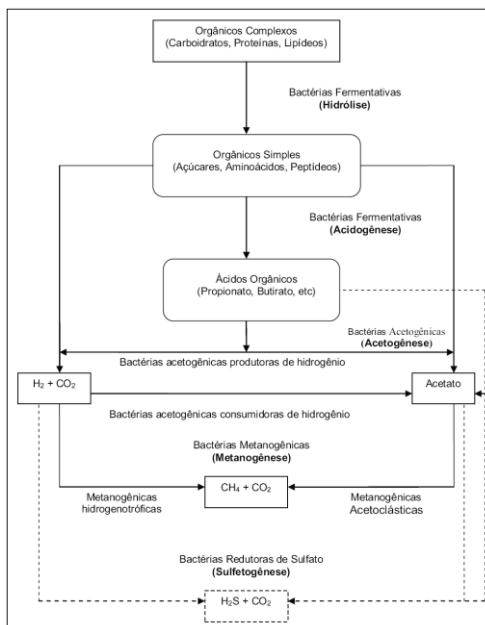
Este sensível sistema ecológico está interligado por uma complexa rede com etapas sequenciais (reações em cadeia) e simultâneas em que o produto de um determinado grupo de bactérias será utilizado como alimento por outros grupos de microrganismos. Assim, vários produtos intermediários são continuamente gerados e

imediatamente processados. Essas rotas metabólicas de degradação de substratos orgânicos no processo de digestão anaeróbia são complexas, e não há uma modelagem completa do processo que considere toda sequência diversificada de reações. Juntamente com o substrato a ser consumido também é produzida uma quantidade reduzida de biomassa bacteriana devido às taxas de crescimento e reprodução destes microrganismos.

Segundo Foresti et al. (2006), de maneira simplificada, o processo de digestão anaeróbia divide-se em quatro etapas distintas principais, sendo elas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, podendo haver a inclusão de uma fase sulfetogênica. A Figura 1 ilustra as rotas metabólicas e os grupos microbianos particulares envolvidos na digestão anaeróbia, incluindo a fase de redução do sulfato, ou sulfetogênese.

Estas etapas, ou estágios, devem ocorrer na mesma “velocidade”, sincronizadas, a fim de evitar distúrbios, como o acúmulo de ácidos, que pode resultar na falência do reator. O monitoramento de variáveis importantes para o controle do processo da digestão anaeróbia como, por exemplo, temperatura, pH, taxa de carregamento orgânico, nutrientes, produção e composição do teor de metano no biogás é imprescindível para assegurar a boa relação entre as etapas da digestão (RAJESHWARI et al., 2000).

Figura 1: Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de Lettinga et al. (1996).

Envolvendo a interação entre microrganismos e substrato, as etapas do processo de digestão anaeróbia são:

Hidrólise: Nesta etapa, também considerada como etapa sólida, a matéria orgânica particulada complexa insolúvel (polímeros) é convertida em materiais dissolvidos mais simples (moléculas menores), mais solúveis, como proteínas, lipídios e hidratos de carbonos (polímeros), os quais podem atravessar as paredes celulares dos microrganismos fermentativos. Esta conversão de materiais particulados em materiais dissolvidos é conseguida através da ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas, quimioheterotróficas não metanogênicas, facilitando a absorção pelas paredes celulares das bactérias acidogênicas.

Acidogênese: Nesta fase, líquida, os produtos solúveis oriundos da fase de hidrólise são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas acidogênicas, sendo convertidos em diversos compostos mais simples, os quais são então excretados pelas células. Entre estes compostos mais simples produzidos estão os

ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, além de novas células bacterianas. Como os ácidos graxos voláteis são os principais produtos dos organismos fermentativos, estes são usualmente designados de bactérias fermentativas acidogênicas. Estes produtos metabólicos serão a base do consumo das bactérias acetogênicas e arqueias metanogênicas.

Acetogênese: Nesta fase, líquida, do processo de digestão anaeróbia as bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica, produzindo ácidos orgânicos pela ação das bactérias sintróficas acetogênicas. Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas - o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato - serão o substrato básico apropriado para as bactérias metanogênicas, do grupo arqueia, na próxima fase, a metanogênica.

Metanogênese: Nesta etapa, gasosa, do processo de degradação anaeróbia de compostos orgânicos, atuam sobre os produtos gerados nas etapas anteriores principalmente dois grupos de bactérias metanogênicas: as arqueias metanogênicas e as arqueias metanogênicas acetoclásticas. Nesta fase as bactérias metanogênicas produzem metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) em função de sua afinidade por substrato e capacidade de produção de metano. As bactérias do grupo das arqueias metanogênicas acetoclásticas são responsáveis pela produção de aproximadamente 70% de metano do processo. Enquanto que a rota das bactérias arqueias metanogênicas hidrogenotróficas produz cerca de 30% do metano do processo, utilizando hidrogênio como fonte de energia, e gás carbônico (CO_2), como aceptor de elétrons, resultando maior liberação de energia e formando metano a partir dessa reação.

Na sulfetogênese ocorre a produção de sulfetos a partir de sulfato e outros compostos a base de enxofre que são utilizados como aceptores de elétrons durante a oxidação de compostos orgânicos. Durante este processo, sulfato, sulfito e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfeto, através da ação de um grupo de microrganismos anaeróbios estritos, denominadas bactérias redutoras de sulfato (ou bactérias sulforedutoras). Na presença de sulfato, as bactérias redutoras de sulfato (BRS) passam a competir com os microrganismos fermentativos, acetogênicos e metanogênicos pelos substratos disponíveis.

Como a maioria dos processos naturais de fermentação, a biodigestão anaeróbia depende de mecanismos autorreguladores decorrentes das interações entre os diversos grupos de bactérias participantes do processo com funções distintas e específicas, capazes de manter o pH e o potencial redox do sistema no sentido de otimizar a metanogênese.

Os avanços no conhecimento dos processos anaeróbios, principalmente os relacionados à compreensão dos aspectos microbiológicos, bioquímicos, termodinâmicos, cinéticos, fatores ambientais interferentes, toxicidade e comportamento hidrodinâmico dos reatores, possibilitaram um melhor entendimento dos fenômenos que ocorrem nestes processos. Ressaltamos aqui a contribuição dos pesquisadores James C. Young, Perry L. McCarty e Gatzke Lettinga para o desenvolvimento da digestão anaeróbia (McCARTY, 1982; LETTINGA et al, 1980).

Sabe-se que a interação entre os fenômenos físicos, químicos e biológicos e não apenas um deles, é que influencia no desempenho de um reator anaeróbio e de seu potencial de uso. É importante ressaltar que nestes reatores biológicos ocorrem transformações complexas, com a participação efetiva de microrganismos vivos. Portanto, quando a configuração de um reator modificar diretamente um destes aspectos, é provável que o efeito sobre os demais seja tão significativo que comprometa o desempenho esperado. Vários pesquisadores têm estudado estas interações, entre eles: Zeikus (1980); Speece (1983); Van Haandel e Lettinga (1994); Foresti (2002) e Angenent et al. (2004).

3.5. PRINCIPAIS FATORES INTERVENIENTES NOS PROCESSOS ANAERÓBIOS

Vários fatores influenciam no desempenho da digestão anaeróbia, dentre eles destacamos como principais os seguintes:

3.5.1. Temperatura

A temperatura em que se desenvolve o processo é um dos mais importantes fatores intervenientes no processo de digestão anaeróbia. Ela afeta a atividade bacteriana e, por consequência, a produção de biogás e a eficiência do processo (CAMPOS, 1998). Em

temperaturas extremas, muito baixas ou muito altas o processo anaeróbico pode ser interrompido.

Segundo Metcalf & Eddy (2003) existem três faixas em que se desenvolve o processo anaeróbico de acordo com a temperatura: a faixa Psicrófila ($t < 20^{\circ}\text{C}$), a faixa Mesófila (de 20 a 45°C) e a faixa Termófila (de 45 a 65°C).

O processo anaeróbico se desenvolve melhor em duas faixas de temperatura: mesofílica (de 35 a 40°C) e termofílica (de 55 a 65°C);

3.5.2. pH ou Potencial Hidrogeniônico

O valor do pH é outro importante parâmetro para o metabolismo das bactérias, o valor de pH em torno de 7 é o ideal para o desenvolvimento do processo.

3.5.3. Tamanho das partículas

A ação dos microrganismos sobre o substrato pode ser dificultada se o resíduo for composto de partículas de grandes dimensões. Assim, torna-se necessário um pré-tratamento como por exemplo a moagem, que aumenta a superfície de contato entre o material e os microorganismos, facilitando tanto essa ação como a mistura do material. Resíduos ligno-celulósicos podem necessitar de pré-tratamento para liberar a celulose e hemi-celulose da lignina. A palha, por exemplo, deve ser pré-fermentada e se possível triturada em pequenos pedaços para facilitar o processo.

No caso da utilização de substratos de restos de comida é conveniente que este material seja triturado antes de sua introdução no reator.

3.5.4. Substâncias tóxicas

A digestão anaeróbia pode ser inibida devido a presença de substâncias tóxicas, como antibióticos, metais pesados e agrotóxicos.

3.5.5. Nutrientes

Para que o carbono presente na matéria orgânica possa ser convertido em metano, é necessária a presença de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, em quantidades apropriadas. São recomendadas as seguintes relações em massa: Carbono/Nitrogênio de

20/1 a 30/1 e de Carbono/Fósforo de 150/1. A relação C/N influencia o processo e, consequentemente, a produção de gás.

Misturar matérias de fermentação com altas concentrações de nitrogênio e baixa relação C/N (como por exemplo, dejetos de aves), com material de fermentação com alta concentração de carbono (por exemplo, restos de culturas agrícolas) propiciam uma elevada produção de gás.

Para sobreviver os microrganismos necessitam ainda de certas concentrações, mínimas, de elementos traços ou micronutrientes.

3.5.6. Hidrodinâmica

Deve-se minimizar os espaços mortos e, consequentemente, a ocorrência de curto circuitos no reator, promovendo a mistura do substrato por bombeamento de líquido, gás ou ainda por agitação mecânica.

3.5.7. Tipo de Substrato

Apesar de toda matéria orgânica ser possível de ser degradada, existem compostos que são de difícil degradação (recalcitrante) e outros que oferecem as condições ótimas para ser convenientemente degradados.

Nos reatores anaeróbios podem ser utilizados diversos tipos de biomassa, seja ela residuária (como as sobras de alimentos e dejetos de suínos ou gado bovino), subproduto (como a vinhaça da destilação fracionada do caldo de cana fermentado para a obtenção do etanol e a glicerina de usinas de produção de biodiesel), ou culturas que podem ser produzidas de maneira combinada, visando a sua utilização como fonte de biomassa para reatores anaeróbios, como é o caso da silagem de milho e a biomassa microalgal (de microalgas produzidas em fotobioreatores).

Para que o processo de digestão ocorra de forma eficiente, é necessário adequar a diluição conforme as características do substrato. A diluição adequada para dejetos de animais deve corresponder aproximadamente a 6% de sólidos totais no substrato dos reatores anaeróbios. No entanto, há processos na Europa em que o substrato do reator pode conter até 20% de sólidos totais, sendo classificado como processo úmido. Substrato com mais de 20% de sólidos totais são classificados como processo de digestão anaeróbio seco, muito aplicado na digestão de resíduo orgânico municipal. Cada processo,

úmido ou seco, tem características diferenciadas, influenciando principalmente no tempo de retenção hidráulica e no manejo do substrato no interior do reator.

Os biodigestores carregados com substratos de sobras de alimentos em geral operam com teor de sólidos totais em torno de 12%.

3.6. REATORES ANAERÓBIOS

Nos reatores anaeróbios busca-se reproduzir as condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento da digestão anaeróbia. Pretende-se com isso, controlar o processo de decomposição anaeróbia, criando condições propícias para manter a biomassa de bactérias ativas, de maneira que seja alcançada a eficiência almejada para o sistema.


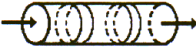


A biotecnologia anaeróbia de alta taxa vem conseguindo superar as dificuldades iniciais de aplicação prática, melhorando a estabilidade dos processos e viabilizando o uso desta tecnologia em larga escala. Como exemplo deste desenvolvimento, pode-se citar a implantação de grandes sistemas de biodigestores anaeróbios, principalmente em países desenvolvidos, com destaque para as usinas de biogás construídas na Alemanha.

Existem diversos tipos de reatores anaeróbios os quais podem ser classificados de acordo com suas características principais. A Figura 2 apresenta esquemas de reatores classificados em função do escoamento hidráulico.

O reator de batelada não apresenta entrada nem saída de vazão da massa sólida ou líquida durante sua reação. Estes reatores têm seu escoamento intermitente, ou seja, após seu enchimento, geralmente de uma única vez, a retirada do material será realizada apenas após um conveniente tempo de detenção hidráulica, após o substrato ser processado.

É um tipo de reator geralmente utilizado para substratos com pouco teor de umidade e com produção sazonal como, por exemplo, resíduos sólidos orgânicos. Nesta configuração de biodigestor a produção do biogás só é constante quando forem colocados em operação vários reatores em série.

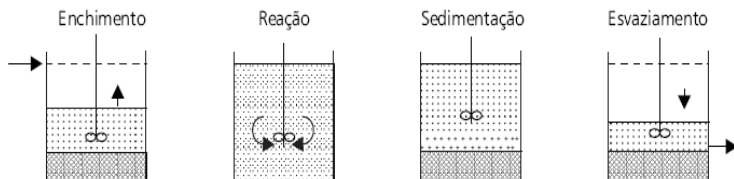
Figura 2: Classificação dos reatores em função do escoamento hidráulico

Tipo de Reator	Representação Esquemática	Descrição e Comentários
Reator descontínuo ou de batelada		Escoamento descontínuo. Vazão nula. Normalmente o conteúdo do líquido é completamente misturado.
Escoamento pistonado ou tubular		É aquele escoamento contínuo no qual as partículas do fluido passam através do reator com a mesma sequência com que entram. Estes elementos podem apresentar mistura localizada ou transversal mas não mistura longitudinal ou axial, e todos os elementos de fluido permanecem no reator por um período igual ao tempo teórico de detenção.
Escoamento de mistura completa		Apresenta mistura tanto transversal como longitudinal, e um elemento de fluido que entra é imediatamente dispersado em toda a massa líquida presente no reator. A concentração do efluente coincide com a concentração presente no reator.
Escoamento não-ideal		Escoamento contínuo, representam uma combinação complexa das características dos escoamentos pistonado e de mistura completa, associados à presença de alguns fatores ou alterações, como: regiões estagnantes ou zonas mortas, recirculações e formação de canais preferenciais de escoamento ou curtos-circuitos.

Fonte: Andrade (1995)

Uma das modalidades deste tipo de reator é o reator sequencial de batelada, cujas unidades possuem mistura completa, ou seja, a concentração de qualquer parâmetro deve ser igual em qualquer ponto do reator. Este reator tem a grande vantagem de não apresentar curtos-circuitos e de diminuir muito a possibilidade de zonas mortas, caso sejam bem projetados. A Figura 3 apresenta um esquema de reator batelada em sequência operacional.

Figura 3: Reator de batelada em sequência operacional.



Fonte: CAMPOS (1998)

Estes biodigestores sequenciais de batelada são simplificados e podem ser utilizados para o processamento de diversos substratos. Por causa da baixa carga, exigem maiores volumes de reator do que os reatores de carregamento contínuo e são mais susceptíveis a cargas tóxicas.

No reator de batelada o esvaziamento é feito de maneira que uma pequena quantidade permaneça para servir de inóculo para a carga seguinte. O novo substrato é então misturado com um material contendo microrganismos aclimatados e ativos.

Quanto a posição em relação ao solo, os reatores anaeróbios podem ser construídos enterrados, semienterrados ou sobre o solo (apoiados). A escolha por um destes tipos de construção dependerá entre outros fatores: do nível do lençol freático, da ocorrência de rochas que dificultam a escavação e a instalação do biodigestor, do tipo de material de construção disponível, do perfil hidráulico mais econômico para o sistema, do tipo de sistema de aquecimento que será utilizado (quando necessário).

Os biodigestores tipo batelada, descontínuos, são os mais simplificados, são dotados com apenas uma câmara de digestão, sendo de fácil operação e manutenção. Pode ser alimentados tanto com dejetos diluídos em água quanto com resíduos vegetais com alta concentração de sólidos. Eles são carregados de uma só vez, mantido fechado durante um período conveniente, e a matéria orgânica é fermentada e depois descarregada em um momento posterior.

Para substratos com alta concentração de sólidos e com decomposição lenta, existe uma variante deste tipo de reator batelado que contém um sistema de bombeamento para recirculação da fase líquida. Neste caso, o líquido fica sendo recirculado pelo substrato sólido, possibilitando maior contato entre o substrato e

microrganismos e diminuindo o tempo de detenção hidráulico o que aumenta a eficiência do reator.

Já nos reatores de escoamento contínuo, o substrato é continuamente adicionado ao reator ou em curtos intervalos de tempo, quando comparado com o tempo de detenção hidráulico. Neste caso, o biofertilizante (efluente do biodigestor) é removido conforme o biodigestor vai sendo alimentado, sem a necessidade de interromper o processo, gerando um escoamento “contínuo” ou “semi-contínuo”.

Existem inúmeros modelos de reatores anaeróbios com alimentação contínua, os quais diferem em relação a vários aspectos como: configuração, comportamento hidrodinâmico e procedimentos de operação. Nestes reatores, a carga e a descarga do substrato podem ser realizadas através de sistemas de bombeamento ou por gravidade, mas geralmente a descarga é realizada por gravidade, por ser mais econômico.

Nos biodigestores utilizados para processamento de resíduos sólidos orgânicos, a alimentação às vezes pode não ser de forma constante, dependendo do tipo de instalação e do manejo adotado. Nestes sistemas o substrato deve ter uma concentração de sólidos totais máxima em torno de 12%, para evitar obstrução do tubo de carga e facilitar a circulação da biomassa. Já os sistemas que utilizam silagem, como a de milho, como substrato geralmente utilizam como um dos componentes do sistema de alimentação os “parafusos de Arquimedes”, os quais são utilizados para a dosagem da biomassa.

Os processos biológicos de tratamento geralmente são considerados mais econômicos quando operados a baixos tempos de detenção hidráulica e tempos de retenção de sólidos suficientemente longos para permitir o crescimento de microrganismos. Este foi, por muitos anos, o maior problema da digestão anaeróbia, uma vez que o tempo de retenção de sólidos não podia ser controlado independente da carga hidráulica.

Então os microrganismos com baixas taxas de crescimento necessitavam de tempos de retenção longos demais e, por isso, reatores de volumes grandes. O desenvolvimento dos processos anaeróbios de alta taxa resolveu este problema, pois estes são capazes de propiciar o desenvolvimento de grandes quantidades de biomassa, de elevada atividade, que pode ser mantida nos reatores mesmo quando operados com baixos tempos de detenção hidráulica.

Nos **reatores de mistura completa**, as concentrações do substrato são iguais em qualquer ponto da câmara de digestão,

independente do ponto de coleta. Ou seja, a composição do material na câmara de digestão é uniforme e igual a composição na saída do reator. O conteúdo está em completa homogeneização e a taxa de reação é a mesma em todo o reator. A vazão de entrada nestes reatores é diferente de zero e igual à da saída.

Os Reatores Tubulares (ou pistonados) ideais possuem configuração de um tubo sem agitação, no qual todas as partículas escoam com a mesma velocidade na direção do escoamento.

Quanto ao **número de estágios**, os sistemas de biodigestores podem operar com um ou dois estágios. Os sistemas de um estágio caracterizam-se por ocorrerem no mesmo reator e no qual todas as etapas do processo de digestão anaeróbia ocorrem simultaneamente. Nos sistemas de dois estágios, por outro lado, as etapas do processo de digestão anaeróbia são segregadas em dois reatores distintos. No primeiro reator ocorrem as etapas de hidrólise e acidogênese, enquanto no segundo reator ocorrem as etapas de acetogênese e metanogênese.

As principais vantagens de se promover a separação de fases estão relacionadas com o aumento da velocidade de degradação do substrato, e com a melhora no desempenho do sistema, principalmente para a degradação de substratos heterogênicos

Os sistemas de biodigestores rurais contínuos mais difundidos são os modelos: Modelos Indiano, Modelo Chinês, Modelo Canadense de escoamento tubular ou *plug flow*, Reatores *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), Modelo Alemão ou *Continuous Flow Stirred-Tank Reactor* (CSTR).

3.7. BIODIGESTORES RESIDENCIAIS

Para fins residenciais, pequenos biodigestores (com câmara de digestão de até 50 m³) podem fornecer biogás para utilização em diversas finalidades, como: cozimento (em fogões), aquecimento de água ou de ambientes e iluminação (em lamparinas a gás). A opção do aproveitamento energético do biogás para geração de energia elétrica geralmente apresenta viabilidade para grandes biodigestores ou para condomínios energéticos.

Devido às vantagens ambientais da utilização do biogás em substituição aos combustíveis fósseis, e a grande disponibilidade de matéria prima proveniente da biomassa residual gerada em diversas atividades, a tecnologia dos biodigestores vem ganhando destaque como uma energia renovável competitiva em diversos países.

Países desenvolvidos da Europa e da América do Norte investem na produção de biogás como uma alternativa de tratamento de efluentes e de resíduos da agricultura, bem como fonte energética, por possuírem uma rede de abastecimento de energia bem estabilizada. Estes países vêm investindo em grandes plantas de biogás, automatizadas e com grande capacidade de geração de energia elétrica.

Recentemente, o governo Australiano divulgou em seu site oficial uma série de leis e regulamentos que facilitam e estimulam projetos que envolvam o aproveitamento energético do biogás. Dentre eles estavam o suporte legal para venda da energia elétrica ou biogás produzidos. Por outro lado, países em desenvolvimento como China, Índia e países da América do Sul e Central apostam no aproveitamento energético do biogás como forma de diminuir a desigualdade de acesso a itens básicos de sobrevivência como o aquecimento e a energia elétrica. Nesta mesma perspectiva, o aproveitamento energético da biomassa diminui problemas graves de saúde pública e saneamento que ocorrem devido à má gestão dos resíduos sólidos urbanos, muito comuns nessas regiões. Em virtude da necessidade de tecnologias de baixo custo de implantação e manutenção, a maioria dos biodigestores dessas localidades é pequenas plantas, pouco mecanizadas e tem como principal finalidade a queima do biogás para cozimento, evitando gastos com geradores e sistemas de purificação do biogás.

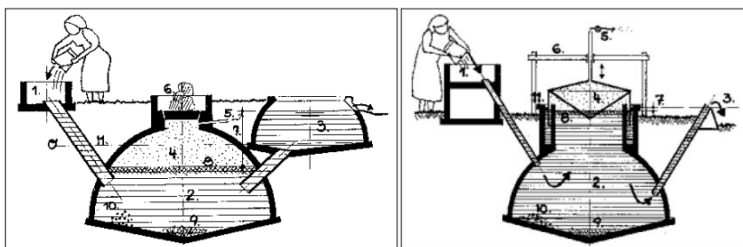
Em 1995, 75% da população Indiana vivia em zonas rurais. Ou seja, 896 milhões de pessoas viviam em áreas onde 60% da energia requerida é empregada para o aquecimento das residências e queima em fogões a lenha, carvão ou outros combustíveis sólidos (RAVINDRANATH E HALL, 1995).

A eficiência de fogões movidos a biogás disponíveis no mercado varia entre 20-56%, dependendo do tipo e condições de conservação do fogão (ITODO, 2007). Iniciativas governamentais, como a National Biomass Cookstoves Initiative (NCI) na Índia, estão sendo desenvolvidas para aumentar a eficiência de fogões e sistemas de aquecimento, e melhorar a tecnologia do biogás nesses países.

Neste contexto, muitos tipos de biodigestores residenciais são utilizados em todo o mundo. De uma maneira geral, estes biodigestores adotados em países em desenvolvimento são projetados para digestão de resíduos orgânicos residenciais e são classificados como biodigestores de baixa taxa ou de 1ª geração. Estes

biodigestores são desprovidos de sistemas de aquecimento, podem ou não contar com sistemas de agitação e foram projetados tendo em vista a necessidade de desenvolver um produto acessível que fosse capaz de solucionar os problemas de fornecimento de energia existentes. Os três tipos de digestores que mais empregados nesses casos são: Biodigestor Modelo Chinês, Biodigestor Modelo Indiano e os Biodigestores Tubulares (SASSE, 1988). Na Figura 4 apresentam-se os Modelos Indiano e Chinês e na Figura 6 um tipo de biodigestor Modelo Tubular.

Figura 4: Representação do Biodigestor modelo Chinês (esquerda) e Biodigestor Modelo Indiano (direita).



Fonte: SASSE (1988)

3.7.1. Biodigestor modelo chinês

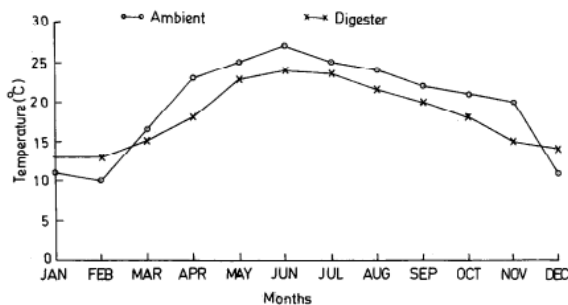
Também conhecido como Biodigestor de cúpula fixa, este modelo é normalmente construído sob o solo, em alvenaria, e comum teto abobadado que funciona como câmara gás. A ideia principal deste modelo é que, na medida em que ocorre a digestão do substrato e produção do biogás, a pressão interna do biodigestor aumenta e o material digerido é deslocado para a caixa de saída até que o gás seja consumido e com o alívio da pressão haja retorno do material deslocado. Este modelo de biodigestor caracteriza-se pela existência de uma cobertura de câmara de gás fixa e pela consequente variação interna da pressão do gás, de acordo com a produção e o consumo de biogás, assim como do carregamento do substrato e da retirada do digestato.

Os modelos construídos em alvenaria geralmente são de baixo custo, mas devem ser muito bem projetados para prevenir a ocorrência de vazamentos de gás. Para garantir o bom funcionamento, o substrato deve ser adicionado ao reservatório com uma frequência conveniente para que o reator seja considerado de alimentação contínua. Estes

reatores operam com concentrações de sólidos totais em torno de até 8%, para prevenir entupimentos das tubulações de entrada e de saída de substrato.

Kalia et. al (1998) acompanhou por 10 anos o comportamento de um biodigestor Tipo Chinês de ferrocimento, instalado na Índia. O biodigestor tinha capacidade para processar 3 m³, alimentação diária de 60 kg e um tempo de retenção hidráulica de 55 dias. Neste trabalho foi observado que a temperatura do substrato variou consideravelmente de acordo com a temperatura ambiente, apresentando variações de até 15 °C entre o verão e o inverno da região. Devido à queda de temperatura na câmara de digestão do substrato e, conseqüentemente, da diminuição da produção de biogás no reator, havendo a necessidade de aquecer o substrato, o que pode ser realizado por meio de fontes renováveis de energia. Na Figura 5 é possível observar o comportamento da variação da temperatura na câmara de digestão do biodigestor durante um ano de monitoramento realizado nesta pesquisa.

Figura 5: Variações de temperatura do ambiente e do substrato ao longo de 1 ano



Fonte: Kalia et. al (1998)

Ainda neste trabalho, o biogás gerado pela digestão de esterco tinha composição de 55-60 % de metano e 40-45 % de dióxido de carbono, independente da estação do ano. A produção diária de biogás variou de acordo com a temperatura do ambiente, tendo a maior eficiência nos períodos de verão (aproximadamente 2000 L/dia de biogás), e posteriormente, um decréscimo de 23-37 % no inverno (1600L/dia). Ao longo dos anos a taxa de produção de biogás também não foi constante. Nos primeiros cinco anos houve uma queda de 34%

na produção de biogás e, nos cinco anos subsequentes, observou-se que o material tinha uma tendência a se acumular na região periférica do reator formando áreas de curto-circuito. Por fim, concluiu-se que limpezas regulares do digestato, diminuem a ocorrência de curto circuito e aumentam a eficiência do digestor.

3.7.2. Biodigestor modelo indiano

O biodigestor modelo indiano se caracteriza por possuir uma cúpula móvel como câmara de biogás, que flutua o tanque de fermentação. A finalidade da cúpula é armazenar o biogás produzido e garantir, a pressão constante. Dessa forma, à medida que o gás é produzido, e não é consumida, a câmara de biogás desloca-se verticalmente para cima, e quando consumido, o gasômetro desloca-se novamente para baixo. (RAJENDRAM et al., 2012; SINGH et al., 2004).

O sistema pode ser alimentado diariamente com resíduos orgânicos diluídos em água e, assim como no modelo chinês, quanto mais contínua for a alimentação, melhor será o desempenho do reator. Assim como no caso do modelo chinês, a concentração de sólidos totais (ST) do substrato deve ser de até 8% para facilitar o escoamento no reator. Procedimentos de manutenção deste modelo incluem a retirada do lodo sedimentado, controle de vazamentos e conservação da estrutura (Rajendran et al., 2012). De acordo com Cheng et al. (2014), este tipo de reator, quando possui a cúpula da câmara de biogás em aço carbono tende a durar menos que o modelo chinês devido a provável corrosão deste componente.

3.7.3. Biodigestor modelo tubular

O digestor tubular consiste em um “balão” tubular, geralmente feito de polietileno ou PVC, enterrado em uma vala. Possui tubulações de entrada de substrato e saída do digestato além de uma tubulação na parte superior do reator para a retirada de biogás (Figura 6). O comportamento hidrodinâmico característico deste reator é o de escoamento pistonado (*plug flow*). Assim como nos modelos anteriores, geralmente estes reatores não contam com nenhum tipo de agitação que evite a sedimentação do lodo digerido ou a quebra da espuma.

Garfi et al. (2011), concluíram que o balão tubular feito de plástico funciona como uma estufa que aumenta a retenção de calor

durante o dia, e evita perdas de calor durante a noite. Logo, observou-se que as temperaturas medidas no interior do reator (15 – 60 °C) eram sempre maiores que a temperatura ambiente (10-30 °C) e a temperatura do substrato manteve-se constante ao longo do tempo (aproximadamente 20°C). Recentemente, uma nova metodologia para dimensionamento de digestores tubulares foi proposta por Martí-Herrero e Cipriano (2012) baseado no ângulo das paredes do balão, e a relação entre o comprimento do arco referente ao armazenamento do gás e a largura superior da vala. A partir destes dois parâmetros e a influência da pressão do biogás, podem-se determinar as dimensões ótimas da trincheira na qual será instalado o digestor tubular.

O primeiro registro de uso deste tipo de biodigestor tubular foi na República da África do Sul, em 1957 (GUNNERSON et al., 1989), mas foi nos Estados Unidos que o biodigestor tubular foi intensamente estudado por pesquisadores da Universidade Cornell, liderados pelo Prof. William Jewell. Este modelo de biodigestor é simplificado (JEWELL et al., 1997) e geralmente apresenta baixo custo de implantação (JEWELL et al., 1981).

Nos Estados Unidos, este modelo de biodigestor tubular foi preferencialmente utilizado para dejetos de bovinocultura-de-leite, operando com teores de sólidos entre 11 e 13 %. Nas condições americanas, este tipo de biodigestor tem um alto índice de insucesso. De um total de 30 digestores tubulares implantados desde 1980, em 1995 somente nove continuavam operacionais, configurando um índice de insucesso de 77 %. Entre as razões apontadas para este insucesso, a principal foi de falha de projeto, por desconhecimento das características hidráulicas do modelo. Outra causa importante deste insucesso é formação de crosta, devido à deficiência de mistura (EPA, 2003).

Em um levantamento, realizado pela equipe do Programa de Sistemas Ambientais de Bovinocultura de Leiteiro, do Departamento de Biologia e Engenharia Ambiental (BEE) do Colégio de Agricultura e Ciências da Vida (CALS) da Universidade Cornell, sobre os biodigestores para processamento de dejetos de animais implantados no Estado de Nova Iorque, podemos observar que das 20 unidades existentes, 6 estavam desativadas por apresentarem problemas, e das 14 unidades em operação, 10 eram do Modelo Tubular, de escoamento pistonado, (SCOTT et al., 2010). Constata-se ainda que neste mesmo levantamento, estavam em fase de planejamento a implantação de 14

biodigestores, dos quais apenas 1, o menor deles, estava previsto para ser de escoamento pistonado.

No Brasil, este modelo vem sendo adotado por grandes empresas, como a Sadia (hoje pertencente a Brasil Foods), que com o Programa 3S (Suinocultura Sustentável Sadia), já tinha instalado até o ano de 2009 biodigestores em mais de 1.086 propriedades de suinocultores integrados (e tinha como meta expandir este programa para os seus cerca de 3.500 parceiros). Estes biodigestores estão colaborando para minorar as externalidades negativas da atividade suinícola, reduzindo as emissões de gases causadores de efeito estufa. Com isto, esta empresa promove a comercialização de créditos de carbono, por meio dos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo – MDL previstos no Protocolo de Kyoto (Sadia, 2012).

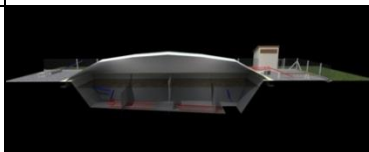
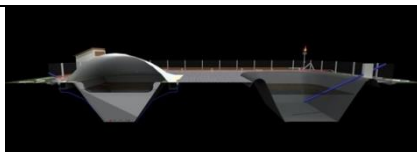
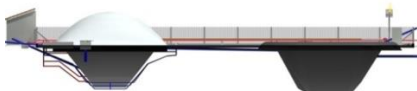
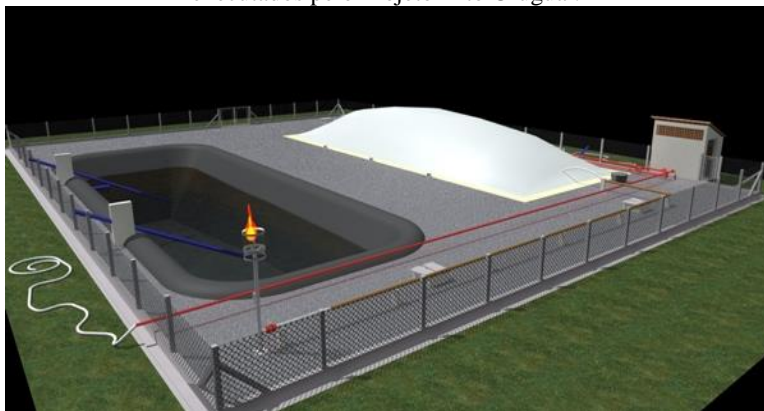
Ressalta-se que este modelo de biodigestor apesar de ser bastante utilizado na suinocultura brasileira (conhecido como biodigestores Modelo Canadense ou de Lagoa Coberta), não apresentam bons resultados devido à diminuição da capacidade de produção de biogás graças às deficiências hidrodinâmicas destes reatores.

No Projeto Alto Uruguai foram implantados 35 biodigestores Modelo Tubular, de escoamento pistonado. Durante a construção destes biodigestores, constatou-se a necessidade de retirada de solos com resistência ao desmonte mecânico, assim como necessidade de drenagem em alguns locais de construção, o que dificultou, onerou e atrasou a instalação destes sistemas. Em alguns destes sistemas foi necessário a instalação de drenos ou de movimentação de terra para elevação do nível da cota de projeto do reator, o que levou também a necessidade de bombeamento, aumentando o consumo de energia.

Estes biodigestores de escoamento pistonado adotados no Projeto Auto Uruguai apresentam ainda as seguintes desvantagens: ocupam grandes áreas (em relação ao tamanho das pequenas propriedades da agricultura familiar do Oeste Catarinense), dificultando sua implantação principalmente em terrenos acidentados; apresentam rápido assoreamento causado pelo agitação e recirculação ineficientes, e agravado pela operação e manutenção inadequadas, entre as quais a alimentação com carregamento excessivo de biomassa. E ainda, o alto tempo de detenção hidráulico (em torno de 35 dias), a inexistência de controle de temperatura da câmara de digestão, e a dificuldade de identificação e recuperação de possíveis vazamentos de substrato para o solo, são também fragilidades deste modelo.

A Figura 6 apresenta imagens do projeto de referência dos 35 biodigestores que foram implantados no Projeto Alto Uruguai.

Figura 6: Detalhes do projeto de biodigestores Modelo Canadense que foram executados pelo Projeto Alto Uruguai.



Fonte: Acervo do Projeto Auto Uruguai- Eletrosul/Eletróbrás.

4. PROCEDIMENTOS METODOLOGICOS

Para alcançar os objetivos propostos por este trabalho, de desenvolvimento de um projeto de um biodigestor residencial capaz de tratar os resíduos orgânicos de um condomínio com, aproximadamente, 100 moradores serão adotados os seguintes procedimentos metodológicos:

- 1) Revisão de publicações que discutem a cerca dos principais parâmetros utilizados no dimensionamento de biodigestores;
- 2) Levantamento dos principais modelos de biodigestores, seus componentes, vantagens e desvantagens, que podem dar subsídios ao projeto do biodigestor proposto neste trabalho;
- 3) Proposta da concepção de um biodigestor para processamento de resíduos sólidos orgânicos de sobras de alimento;
- 4) Dimensionamento de todos componentes do biodigestor, incluindo a elaboração de uma ilustração 3D da concepção final do produto.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Florianópolis é a capital do estado de Santa Catarina. Segundo dados do IBGE (2015) o Município de Florianópolis possui cerca de 420 mil habitantes e teve um crescimento populacional de mais de 23% entre 2000 e 2010 (IBGE, 2010). Neste mesmo período, a geração de resíduos sólidos passou de 106.162 toneladas no ano 2000 para 155.771 toneladas em 2010, valores que representam 47% de crescimento.

A ocupação no município de Florianópolis é caracterizada pelo forte adensamento e verticalização na área central da cidade, e concomitantemente, a distribuição de forma polinucleada nos subcentros de seus doze distritos (Figura 7). Devido à valorização da área central, a população de baixa renda se deslocou para as encostas de morros, zonas de APP's ou zonas de alto risco de forma não planejada, causando problemas crônicos de acesso à serviços públicos como os de saneamento. De acordo com levantamento realizado pelo Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis – IPUF, 58,2% dos habitantes de Florianópolis encontram-se no distrito sede (área central da cidade), enquanto que o restante está distribuído de forma parcialmente homogênea pelos outros distritos da capital.

Figura 7: Distritos Administrativos de Florianópolis



Fonte: Atlas do Município de Florianópolis (2004)

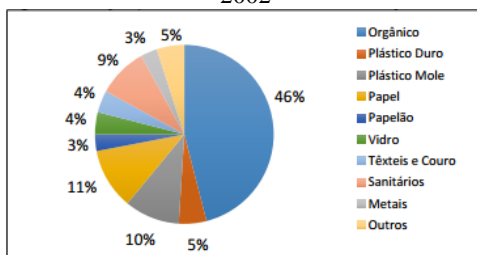
Além dos centros isolados de ocupação, Florianópolis também apresenta as características de conurbação com os municípios vizinhos e intensa atividade migratória. Estes aspectos são resultantes da instalação de empresas na cidade, presença do aparelho estatal, melhores infraestruturas e instituições de ensino superior presentes na capital. Ou seja, além de seus mais de 421 mil habitantes, Florianópolis abriga ainda a geração de resíduos da população pendular que nela reside diariamente, por pelo menos 8 horas.

Hoje, a prefeitura do município contrata a empresa Companhia de Melhoramentos da Capital – COMCAP para realizar a gestão dos resíduos sólidos urbanos de Florianópolis. A empresa realiza a coleta de lixo convencional (orgânicos e rejeitos), coleta seletiva (recicláveis), coleta de resíduos volumosos (móveis, entulhos e etc.), coleta de resíduos hospitalares e também executa outros serviços de limpeza urbana como limpeza e varrição das ruas, pinturas de meio-fio, lavagem de ruas, desratização, entre outros. De maneira simplificada, a logística dos resíduos no município funciona da seguinte maneira: os resíduos coletados na ilha e na parte continental de Florianópolis são encaminhados à estação de transbordo localizada na sede da COMCAP no bairro Itacorubi, região leste da ilha. Neste local, o resíduo da coleta convencional é pesado, transferido para caminhões maiores e encaminhado ao Aterro Sanitário de Biguaçu. A coleta seletiva é realizada em dias específicos e o material recolhido é doado às cooperativas do município de Florianópolis e da região.

4.1.1. Composição gravimétrica dos RSU de Florianópolis

A composição gravimétrica dos resíduos sólidos é um parâmetro determinante na escolha do método de tratamento mais adequado para o processamento destes resíduos. É através dela que é possível estimar o potencial energético desta biomassa residual e a eficiência do tratamento a ser utilizado. O estudo mais completo sobre a composição gravimétrica dos resíduos de Florianópolis foi realizado pela COMCAP, em 2002. De acordo com este estudo, a matéria orgânica compõe 46% dos resíduos coletados.

Figura 8: Composição Gravimétrica dos RSU do município de Florianópolis, 2002



Fonte: Adaptado de COMCAP (2002)

Neste trabalho, optou-se por adotar dados da composição gravimétrica dos resíduos levantados pelo IBGE, presentes no Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos, realizado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. Este valor é uma medida mais recente e portanto mais condizente com a realidade atual. Segundo ele, a fração orgânica dos RSU no Brasil corresponde à 51,4% enquanto que, 31,9% corresponde a materiais recicláveis e 16,7% outros materiais.

4.1.2. Potencial energético dos resíduos sólidos de Florianópolis

Comparando os resíduos orgânicos agroindustriais com os resíduos sólidos domésticos observa-se que os resíduos domésticos apresentam maior variação de composição. Entre estes resíduos domésticos se incluem as sobras de alimentos, podas de árvore, resíduos de jardinagem e fezes de animais que podem variar em quantidade e em composição ao longo do tempo. Como o potencial energético de um substrato muda de acordo com a sua composição,

um método adequado para determina este potencial é o Teste Bioquímico de Metano (BMP). Este teste fornece informações relativas a taxa de degradação do substrato e a produção de metano por kg de resíduo adicionado ao biodigestor. Entretanto, embora o teste BMP resulte no máximo potencial de metano para um determinado substrato, ele não considera as condições de operação do biodigestor e, portanto, não deve ser adotado como um valor absoluto.

Browne et al. (2013), realizou o teste BMP para diversos tipos de resíduos orgânicos, inclusive para sobras de alimentos residenciais, a fim de determinar o maior potencial energético entre diversos substratos. Dentre todos os tipos de resíduos analisados pelo estudo, os resíduos de sobras de alimentos, formados pela mistura dos resíduos residenciais e comerciais (restaurantes), apresentaram a maior produção específica de metano. De acordo com o estudo, este resíduo de sobras de alimento apresentou numa média de produção de 508 L de metano por kg de sólidos voláteis adicionado (508 L CH₄ kg SV⁻¹) com um desvio padrão de 4,2 %. Entretanto, quando são observados apenas os resíduos domésticos, o valor obtido foi de 419 L CH₄ kg SV⁻¹.

A Tabela 1 mostrada a seguir traz a proporção de sólidos totais e sólidos voláteis e a relação Carbono:Nitrogênio (C:N) das sobras de alimento de uma residência e de um estabelecimento comercial.

Tabela 1: Teor de sólidos totais, sólidos voláteis e relação Carbono:Nitrogênio (C:N) de resíduos orgânicos residenciais e comerciais.

<i>Substrato</i>	<i>ST</i> (%)	<i>SV</i> (%)	<i>VS/TS</i>	<i>C</i> (%) <i>TS</i>	<i>H</i> (%) <i>(%TS)</i>	<i>N</i> (%) <i>(%TS)</i>	<i>C:N</i>
<i>Resíduo Doméstico</i>	21,9	19,9	0,91	46,8	6,3	2,7	17,3
<i>Resíduo Comercial</i>	35,4	30,1	0,85	49,0	7,0	3,4	14,4

Fonte: Adaptado de Brown et al. (2013)

Considerando estes dados, assim como os valores encontrados na análise da composição gravimétrica dos resíduos sólidos feita pelo IBGE, 1 kg de resíduo sólido, é composto por 0,514 kg matéria orgânica. Destes, 0,102 kg são sólidos voláteis e, portanto, 1 kg de resíduo é capaz de gerar 42 L de metano. De acordo com o Relatório Anual da COMCAP referente ao ano de 2015, neste ano a empresa coletou aproximadamente: 170 mil toneladas de resíduos na coleta

convencional. Isso significa que, em 2015, 7.140.000 m³ de metano foram enviados ao aterro sanitário de Biguaçu sem aproveitamento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA

Para viabilizar a implantação de um biodigestor, é necessário que os custos de construção e manutenção sejam os mais econômicos quando comparados aos benefícios alcançados.

Alguns cuidados podem ser adotados visando melhorar a viabilidade econômica de um projeto. Esses cuidados estão associados às características do tipo de substrato a ser processado, à configuração do reator a ser adotado e a estabilização do processo de digestão.

- Aumentando a digestibilidade do substrato

Existem tratamentos químicos que utilizam ácidos e bases ou adição de enzimas no substrato que facilitam a conversão de matéria orgânica em biogás. Estes tratamentos geralmente são onerosos e não recomendados para pequenos biodigestores. Entretanto, algumas medidas de baixo custo, como a redução do tamanho das partículas dos resíduos utilizando-se um triturador, podem aumentar a produção específica de biogás por m³ de resíduo adicionado (HARTMANN et al., 2000). Outro meio de aumentar a eficiência do tratamento é investir na CO-digestão de substratos; fazer a digestão de resíduos diferentes que se complementam formando um substrato com grande potencial energético.

- Otimizando a Configuração do Reator

De acordo com Sasse (1998), o reator deve ser impermeável tanto na fase líquida quanto na fase gasosa. Logo, é importante evitar rachaduras nas paredes do biodigestor e perdas de fluidos pelas singularidades. Observar o material de construção, o local em que ele será instalado e a forma do reator, visando diminuir as forças externas e internas que atuam sobre ele, ajudam a evitar fissuras e garantem a estanqueidade. Reatores circulares distribuem as tensões ao longo do reator e evitam rompimentos causados pela concentração de forças. Economicamente falando, reatores circulares também usam menos material para abrigar o mesmo volume que reatores angulares, fato que o torna duplamente vantajoso. Por estas razões é que se optou neste projeto em adotar a forma esférica para o reator proposto.

Outro parâmetro importante no dimensionamento de um Biodigestor é o Tempo de Detenção Hidráulica (TDH). Quanto maior

o TDH, menor a manutenção do reator, maior o grau de digestão do substrato, melhor qualidade do digestato, e maior é a produção final de biogás por m³ de resíduo processado. Por outro lado, altos TDH requerem grande capacidade de armazenamento (SASSE, 1998). Portanto, é importante estabelecer o tempo de detenção hidráulica ideal do substrato, considerando a produção necessária de Biogás que viabilize o projeto e a área disponível para implantação do biodigestor.

- Otimizando o Controle do Processo de Biodigestão

Alguns compostos podem afetar a flora microbiana do reator e comprometer o processo de biodigestão. Os ácidos graxos (compostos de cadeias longas), amônia e sulfatos, quando combinados com pH e temperatura ideal, produzem componentes tóxicos inibindo a proliferação das bactérias ou diminuindo a produção de biogás. (ALATRISTE et al., 2002; SANDBERG et al., 1991). Logo, é importante conhecer as características de cada tipo de efluente, a fim de que se forme um substrato que possa ser bem digerido sem que haja formação de componentes tóxicos para o meio bacteriano.

- Estabilização da microflora nos reatores anaeróbios

Grupos diferentes de micróbios são encontrados quando comparado reatores anaeróbios operando em modo mesofílico (temperaturas entre 30°C e 40°C) e termofílico (temperatura entre 50°C e 60°C). Estudos mostram que, na faixa entre 20°C à 60°C, a microflora presente no substrato geralmente cresce com o aumento da temperatura de operação do reator (LETTINGA, 1995). Temperaturas menores que 20°C e maiores que 60°C resultam em baixa produção de metano e queda na eficiência do reator.

Adotando temperaturas dentro da faixa recomendada, o reator termofílico mostra um fluxo de carbono semelhante ao reator mesofílico. Entretanto, uma quantidade maior de carbono é transformada diretamente em acetato em reatores termofílicos, reduzindo a geração de produtos intermediários (WIEGEL, 1992). Por outro lado, a maioria dos micróbios presentes nos resíduos provenientes da suinocultura, esterco ou resíduos domésticos são mesofílicos, apenas uma pequena parcela é naturalmente termofílica. Isso faz com que a microflora dos reatores mesofílicos possa ser estabilizada mais facilmente, apenas utilizando o substrato. (AHRING, 2002).

5.2. REVISÃO DOS MODELOS EXISTENTES

Tendo como base os três modelos apresentados anteriormente - modelos: Chinês, Indiano e Tubular - diversos modelos de biodigestores residenciais, ou para tratamento de pequenos volumes de substrato, foram desenvolvidos.

A Tabela 2 a seguir mostra alguns modelos de biodigestores disponíveis atualmente no mercado, bem como detalhes técnicos como: capacidades de digestão, níveis de eficiência, dimensões e tipo de substrato. Ressalta-se que as informações contidas nesta tabela ficaram restritas aos poucos dados disponibilizados em manuais, sites e material de divulgação disponíveis para consulta pública.

Em seguida, alguns desses biodigestores foram detalhados de forma a mostrar mais a fundo seus detalhes técnicos que podem, futuramente, contribuir para este trabalho.

Tabela 2: Compilação de modelos de biodigestores existentes, desenvolvidos para tratamento de pequenos volumes.

Biodigestor	País de Origem	Mecanização	Material	Dimensões (m)	Tipo de Resíduo	Volum e Digerido	Características do Substrato (%ST)*	Produção de Biogás (m³ de biogás/ kg de resíduo)	Custo (R\$)**
<i>Britt</i>	Índia	Não	Plástico Reforçado com Fibras	0,90m² x 1,21m	Doméstico	4,5 kg/dia	Não informado	0,16	Não informado
<i>EUColino (Bioferm)</i>	EUA	Sim	Aço	34m x 9,92m x 6,09m	Agropecuário e Doméstico	200 m³	15 – 20%	Não informado	Não informado
<i>Hestia</i>	EUA	Não	Polietileno		Doméstico		Não informado	Não informado	14.382,00
<i>Home Biogás</i>	Israel	Não	Alumínio e PVC	1,27m x 1,65m x 1m	Doméstico	15 L/dia	Não informado	Não informado	3.582,00
<i>HORSE AD 25 Impact Bioenergy</i>	EUA	Sim	Aço		Agropecuário e Doméstico	100 kg/dia	Não informado	0,88	Não informado
<i>Mailhem Biogas Plants</i>	Índia	Sim	Aço	4m² x 4m		50 kg/dia	Não informado	Não informado	Não informado
<i>Biodigestor Tubular Recolast</i>	Brasil	Não	PVC e Telas de Poliéster	7,05m² x 12	Agropecuário e Doméstico		Não informado	Não informado	Não informado

*Recomendada pelo fabricante

**Considerando a cotação do Dólar = R\$3,60

Fonte: Elaboração própria, a partir das referências.

5.2.1. EUCOLino by Bioferm Energy Systems

O EUCOLino by Bioferm é um biodigestor desenvolvido para gerar energia por meio do biogás produzido pela digestão anaeróbia de resíduos orgânicos variados, como esterco bovino, sobras de alimentos e resíduos de jardinagem. O sistema é totalmente mecanizado e automatizado, o que faz com que seu custo de implantação e manutenção sejam relativamente altos. A Figura 9 mostra o layout do Biodigestor EUCOLino By Bioferm Energy Systems.

Figura 9: Foto do biodigestor EUCOLino



Fonte: Manual EUCOLino by Bioferm, disponível em <http://www.biofermenenergy.com/>, acessado em 04/07/2016.

A empresa fornece este produto em diversos tamanhos de acordo com o volume de resíduo produzido. O menor biodigestor disponível (que será usado como objeto de comparação neste trabalho) possui uma estrutura modular de 15,24m x 3,35m x 3,35m e capacidade para digerir aproximadamente 96m³ de resíduo. Embora seja um reator de baixa escala, não é recomendado para instalações unifamiliares, sendo mais indicado para condomínios, shoppings, unidades de agricultura familiar, entre outros.

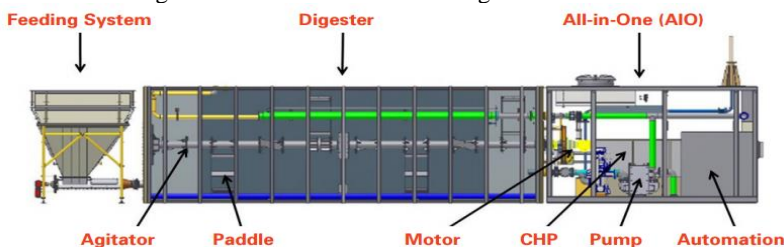
De acordo com o fabricante, este biodigestor é composto por quatro módulos independentes que formam o sistema:

- 1) **Sistema de alimentação:** Recebe os resíduos orgânicos, tritura e mistura com água para alcançar o teor de sólidos de aproximadamente 15%. A câmara de entrada conta com um sistema helicoidal automatizado, que assegura a alimentação

uniforme do biodigestor. O substrato é bombeado a cada 1 hora para o sistema e fica retido em um funil, que detém material suficiente para dois dias de alimentação. Caso conte com tratamento de águas residuais, o efluente é lançado diretamente no biodigestor e misturado com o substrato por meio de misturadores de pás horizontais, localizados dentro da unidade de digestão.

- 2) **Tanque Digestor:** O tanque de digestão conta com um sistema de agitação de pás que move o substrato ao longo do biodigestor durante um tempo de retenção de 28 dias. Inicialmente, o sistema pode ser vendido com uma unidade de digestão. Entretanto, caso haja necessidade, o sistema possui capacidade de expansão em série para dois ou mais tanques digestores.
- 3) **Câmara de gás:** O biogás produzido durante o processo de fermentação é recolhido e armazenado em uma câmara de gás com capacidade de armazenamento de 25m³de biogás (com possibilidade de expansão para 50m³). A câmara fica instalada em um recipiente fechado acima da unidade de digestão.
- 4) **Micro Central Termoelétrica (MCT):** Por fim, o gás é canalizado até a MCT localizada no fim do sistema. Essa unidade, assim como as outras, pode ser ampliada de acordo com a eficiência do processo e qualidade do substrato. Os sistemas possuem geradores com capacidade instalada variando entre 18kW até 100kW.

Figura 10: Detalhamento do biodigestor EUCOLino



Fonte: Manual EUCOLino by Bioferm, disponível em <http://www.biofermenergy.com/>, acessado em 04/07/2016.

O sistema EUCOLino é operado à temperaturas mesofílicas e é capaz de lidar com as baixas temperaturas extremas dos Estados Unidos e Canadá. Para garantir o funcionamento de todos os componentes elétricos, como bombas, misturadores em pás e alimentadores, o sistema consome aproximadamente 12% da energia gerada. Todo o sistema de controle é automatizado, e seu desempenho pode ser acessado a partir de

qualquer computador conectado à internet. Por ser um sistema sofisticado, possui um alto custo de implantação e manutenção, não sendo muito indicado para a realidade proposta por esse trabalho.

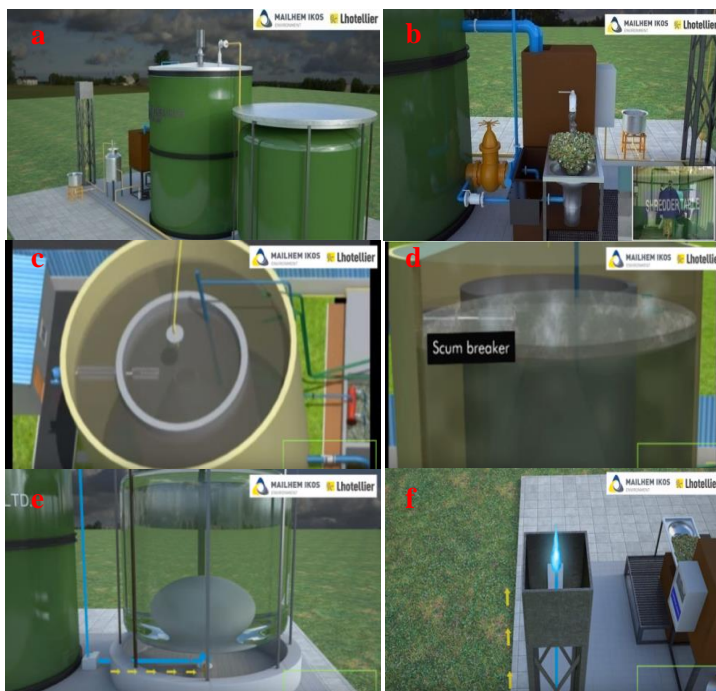
5.2.2. Mailhem Ikos Environment

Na Figura 11 apresenta-se imagens de um vídeo de divulgação disponibilizado pela empresa Mailhem sobre a sequencia de processos realizado pelo biodigestor Ikos Environment.

Mailhem Ikos Environment é uma estação de biodigestão de resíduos sólidos, portátil, capaz de digerir uma quantidade considerável de resíduos e, posteriormente, converter em Biogás para ser usado como combustível(Figura 11a). Dependendo da quantidade de resíduo a ser digerido, o gás pode ser diretamente queimado para aquecimento ou cozimento, ou pode ser utilizado para a geração de energia elétrica, quando acoplado a um gerador a biogás. Este sistema não é recomendado para uso familiar, sendo mais indicado para geradores maiores como condomínios, comunidades, parques industriais e outros.

De acordo com o fabricante, o processo se dá inicialmente pela segregação do resíduo onde todo papel, plástico, embalagens e resíduos não biodegradáveis são removidos. Posteriormente, o resíduo orgânico passa pelo triturador e é misturado com água para alcançar a relação sólido/líquido desejada, formando o substrato ideal (Figura 11b). Em seguida, o substrato é bombeado para dentro do reator. A tubulação entra pela parte superior do biodigestor e lança o efluente na parte inferior. Estes digestores possuem módulos internos que ajudam a reter os sólidos no interior do digestor durante um longo tempo (Figura 11c). Um mecanismo de quebra de espuma foi alocado na parte superior do reator, retirando a espuma e lançando o material excedente para uma câmara concêntrica ao reator (Figura 11d). O biogás gerado é coletado e enviado um balão externo que funciona como câmara de biogás, que infla de acordo com a produção de biogás (Figura 11e). Por fim, o gás armazenado é direcionado para a queima e, em caso de superprodução, um flare é acionado queimando o gás excedente (Figura 11f).

Figura 11: Detalhamento do biodigestor Mailhem Ikos Environment



Fonte: Vídeo de divulgação Mailhem Environment, disponível em <http://www.mailhem-ikos.com/Ikos>, acessado em 04/07/2016.

Quando comparado ao biodigestor EUCOlino, o biodigestor residencial proposto pela Mailhem se torna mais acessível para a realidade brasileira, visto que possui menos partes automatizadas, o que diminui os custos de aquisição e manutenção. Ele também pode ser dimensionado em escalas menores, atendendo melhor as necessidades deste projeto.

5.2.3. HomeBiogas

Desenvolvido em Israel, o HomeBiogas tem como principal diferencial a sua praticidade de instalação. O produto pode ser comprado on-line e é entregue pelo correio, junto do manual de instalação. Peças encaixáveis e de fácil manuseio compõem o sistema, que pode ser instalado pelo proprietário ou pela equipe técnica do HomeBiogás. As dimensões do sistema são: 1,27m x 1,65m x 1m. A Figura 12 traz uma ilustração da configuração geral do biodigestor.

Figura 12: Foto de divulgação do Biodigestor HomeBiogas



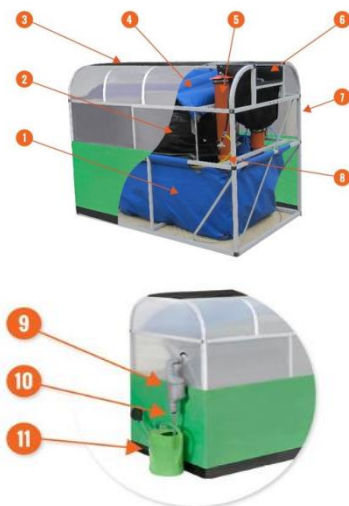
Fonte: Manual HomeBiogas, disponível em <http://www.homebiogas.com/>, acessado em 04/07/2016

Por possuir dimensões reduzidas, quando comparado aos modelos anteriores, este sistema não é capaz de produzir biogás para produção de energia elétrica, apenas para a queima.

De acordo com o fabricante, o equipamento funciona da seguinte maneira: o resíduo sólido é inserido pela parte frontal do biodigestor por uma câmara de entrada (6), passa por um triturador e é lançado para dentro do tanque de digestão por gravidade (1). Enquanto o substrato é digerido, o biogás produzido é armazenado em um balão que funciona como câmara de biogás (2), pressurizado por um sistema de pressurização por “pesos” localizados acima do balão (4). Para que possa ser utilizado, o gás passa por um filtro de carvão ativado, para a remoção de substâncias tóxicas como o H_2S e, por fim, é ligado ao fogão, ou aquecedor (5). O sistema, também realiza a desinfecção do fertilizante por meio de uma unidade de clorificação acoplado a tubulação de retirada do fertilizante (9).

A manutenção do sistema é relativamente simples e consiste na troca do filtro de carvão ativado e na remoção do material sedimentado pela tubulação de descarga de fundo. Por não contar com nenhum sistema de aquecimento, os fabricantes recomendam que o HomeBiogas seja instalado em regiões onde a temperatura média anual não seja menor que 17 °C. Além disso, o sistema conta com uma cobertura de captura solar que funciona como uma estufa (3), retendo o calor fornecido durante o dia dentro do tanque de digestão. A Figura 13 traz um detalhamento dos componentes integrantes deste biodigestor.

Figura 13: Detalhamento dos componentes integrantes do biodigestor HomeBiogas



Fonte: Manual HomeBiogas, disponível em <http://www.homebiogas.com/>, acessado em 04/07/2016

Este sistema é ideal para residências uni familiares, pois tem baixo custo de instalação e fácil manutenção. De acordo com informações fornecidas pelo fabricante, o biodigestor precisa de um tempo entre 2 à 4 semanas para dar partida no processo de digestão e iniciar a produção de biogás. O tanque de digestão tem capacidade para 650 litros de substrato, e a alimentação deve ser realizada diariamente com 6 a 15 litros de substrato. Este montante, deve gerar gás suficiente para 2 à 3 horas de cozimento diárias em fogão de boca única. Simultaneamente, o sistema ainda produz, em média, 5 a 10 litros de fertilizante líquido por dia.

O HomeBiogas se adequa as necessidades deste trabalho, pelo fato de possuir fácil instalação, e baixo custo de manutenção e instalação. Entretanto, este sistema é adequando para pequenas unidades, e seus fabricantes não apresentam versões maiores que possam ser utilizadas para atender um condomínio de 100 pessoas.

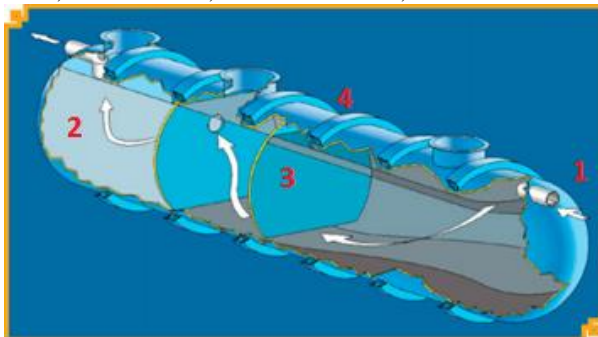
5.2.4. Biodigestor Tubular Recolast

O Biodigestor Tubular Recolast é produzido a partir da confecção de PVC com telas de poliéster. A parte interna da estrutura recebe tratamento com aditivos que proporcionam maior resistência ao ataque de bactérias. A parte externa, recebe tratamento com aditivos que lhe confere maior resistência aos raios U.V. As lâminas que separam as câmaras são acopladas a uma distância de 1,40m entre si, e o biodigestor tem o formato de uma capsula cilíndrica, com diâmetros variando entre 3,0m e 6,0m e comprimento variando entre 12,0 e 25,0 m. O último compartimento do reator tubular funciona como câmara de biogás. Em termos de volume, o tanque de digestão ocupa 70% do reator e a câmara de biogás ocupa 30%.

A entrada e saída dos dejetos são feitas por uma tubulação PVC de diâmetro mínimo de 100 mm localizadas no topo e na base do biodigestor respectivamente. A saída de Biogás se dará por uma tubulação plástica flexível de 2'' conectada na lateral da câmara de biogás.

Assim como o HomeBiogas, o Biodigestor Tubular da Recolast é de fácil instalação, precisando apenas ser montado. Outro ponto favorável ao biodigestor da Recolast é a baixa mecanização do sistema, que faz com que os custos de aquisição também sejam baixos. A Figura 14 traz uma representação gráfica do Biodigestor Tubular Recolast.

Figura 14: Detalhamento Biodigestor Tubular Recolast (1- Tubulação de entrada; 2- Gasômetro; 3- Placas de PVC; 5 - Tela de Poliéster)



Fonte: Manual Biodigestor Tubular Recolast

No entanto, algumas exigências para a instalação do Biodigestor como escavação e instalação de Filtro de linha, caixa de

descarga e medição de volume e caixa de passagem antes do biodigestor encarecem o sistema e necessitam de mão de obra especializada. De acordo com as instruções do fabricante, os dejetos devem ser conduzidos ao biodigestor por gravidade em uma tubulação com declividade mínima de 2%. Outros processos de manutenção incluem a retirada do lodo digerido com frequência quinzenal ou mensal e checagem da estanqueidade das tubulações de gás.

5.3. CONCEPÇÃO DO BIODIGESTOR RESIDENCIAL

De acordo com a fundamentação teórica apresentada sobre os biodigestores estudados, e os levantamentos realizados em trabalhos anteriores, observa-se que para atender as necessidades propostas por esse trabalho é necessário um digestor anaeróbio com os seguintes condicionantes de projeto:

- Trate a parcela sólida e líquida de resíduos orgânicos residências, variados em composição e quantidade;
- Não seja suscetível ao entupimento em suas tubulações;
- Possua baixa manutenção;
- Possa variar em escala de acordo com o volume de resíduo a ser tratado;
- Não necessite de dispositivos mecânicos para aquecimento, bombeamento e agitação do substrato, funcionando por meio da gravidade e variações de pressão;
- Possua inércia térmica elevada, que possa ser operado a temperatura ambiente ou temperaturas acima da temperatura ambiente;
- Seja esteticamente agradável, facilitando a aceitação pelos usuários.

Portanto, estes itens serão os critérios que nortearão as escolhas de materiais, formas e dimensionamento do biodigestor proposto a seguir.

5.4. PROJETO 3D

Para chegar ao design final do produto, observaram-se as vantagens e desvantagens dos biodigestores residenciais já existentes, bem como os parâmetros intervenientes do processo de digestão anaeróbia. A forma esférica foi pensada, pois é uma forma geométrica otimizada, que compreende o maior volume com a mesma área superficial, quando comparada a outras formas geométricas. O biodigestor também foi projetado visando a fácil instalação, não necessitando de obras no local. Assim como o HomeBiogas, as partes componentes do biodigestor podem ser construídas em fábrica e, posteriormente, transportadas ao local de implantação para montagem.

As figuras 15 e 16 ilustram a concepção do biodigestor proposto por meio de imagens desenvolvidas no programa SOLIDWORKS. As

dimensões e detalhamento técnico do produto podem ser conferidos nos itens a seguir e as imagens 3D estão no ANEXO A.

Figura 15: Imagem renderizada do layout final do produto

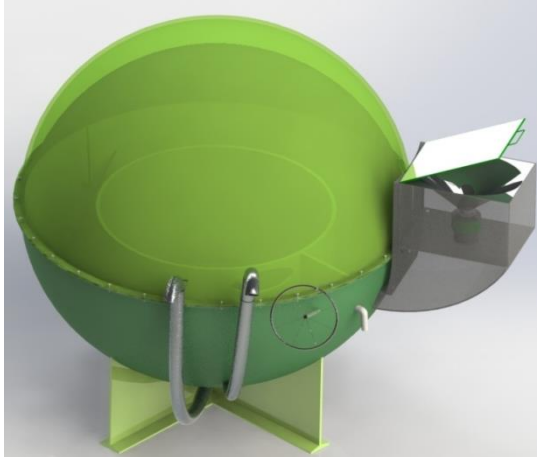
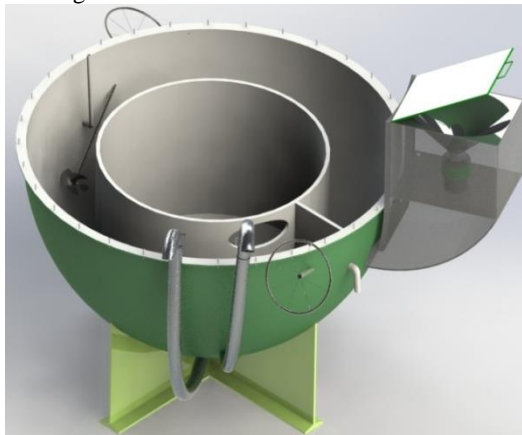


Figura 16: Imagem renderizada do detalhamento interno do biodigestor



5.5. DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento dos biodigestores é realizado a partir de abordagem empírica da configuração de cada sistema e se baseia no Tempo de Detenção Hidráulica (θ_h) ou na Carga Orgânica Volumétrica (CO_v) os quais são escolhidos, em função da Temperatura, do tipo de

substrato, do teor de sólidos totais (ou do correspondente teor de sólidos voláteis totais), entre outros parâmetros, tendo como base dados de operação de aplicações anteriores de reatores reais de escala plena ("escala real"), ou de experimentos de "bancada de laboratório".

Nas variáveis θ_h e CO_v estão embutidos os parâmetros cinéticos e de transferência de massa, bem como a hidrodinâmica do sistema. Definidas essas variáveis, cabe ao projetista definir as características construtivas do sistema.

Os principais parâmetros de dimensionamento de um reator anaeróbio a ser utilizado principalmente para o processamento de biomassa residual de resíduos sólidos orgânicos de sobras de alimento são: Vazão de Alimentação do Reator ou contribuição diária de resíduos sólidos (que depende do número de pessoas, dos hábitos da população atendida), a Temperatura do processamento no reator, o Tempo de Detenção Hidráulica e a Carga Orgânica Volumétrica.

Como se ressaltou na fundamentação teórica deste trabalho, a digestão anaeróbia é um processo biológico, desenvolvido por um consórcio de microrganismos, dinâmico, complexo e com um grande número de fatores intervenientes o que torna a operação do sistema de difícil controle. Para se conseguir um satisfatório desempenho do sistema são necessárias condições adequadas ao processo de digestão anaeróbia. A ocorrência desfavorável ao processo de um dos fatores de influência pode comprometer o processo, inviabilizando o sistema biodigestor.

O biodigestor aqui proposto ser implantado não será um "reator ideal" mas aproximar-se-á de um reator de alimentação contínua com comportamento que pode ser caracterizado como de um reator agitado e com comportamento hidrodinâmico do compartimento externo da câmara de digestão próximo ao de um reator *plug flow*.

Este biodigestor será equipado com sistema de agitação manual e sem controle de temperatura. O objetivo da agitação da biomassa é aumentar a homogeneização do substrato em termos de concentração, possibilitando um efetivo contato entre substrato e microrganismos, agitando os reagentes para garantir a mistura adequada.

Neste projeto almeja-se projetar um reator tropicalizado buscando-se conciliar alta eficiência com simplicidade operacional e baixo custo de implantação e manutenção.

Para realizar o dimensionamento deste biodigestor serão adotados parâmetros de projeto estimando-se que serão tratados os resíduos orgânicos de cozinha de apartamentos de um condomínio

residencial com aproximadamente 100 moradores. O gás gerado na decomposição deste resíduo poderá ser utilizado, entre outras possíveis finalidades, as seguintes: iluminação do condomínio ou uso em queimadores para cozimento de alimentos. Decidiu-se fazer os cálculos para estas duas opções. Não se optou apenas pelo aproveitamento energético do biogás para cozimento dos alimentos visto que, nem sempre é viável instalar tubulações de gás para queima em fogões em condomínios já construídos. Portanto, decidiu-se aplicá-lo em mais de uma situação para conferir a versatilidade do equipamento.

Para fins de dimensionamento, considerar-se-á que: 17 lâmpadas serão acesas diariamente 8 horas por dia ou 24 fogões de boca única queimarão 3 horas de biogás por dia.

Para determinação da produção diária de resíduo por morador do condomínio, consideraram-se os dados fornecidos no Relatório Anual da COMCAP relativo ao ano de 2015. Neste relatório consta que foram recolhidos 170 mil toneladas de resíduos referentes às 249.477 pessoas atendidas na coleta convencional, ou seja, 1,87 kg de resíduo por habitante por dia. A fração orgânica deste resíduo foi calculada de acordo com os valores fornecidos por IBGE (2010). A taxa de ST (%) presente em resíduos sólidos orgânicos foi adotada conforme encontrada por Browne et al. (2013), 21,9%.

Dados utilizados no Projeto:

População Atendida: 100 pessoas

Tempo de Retenção Hidráulica (TDH): 36 dias

Produção Diária de Resíduo por pessoa: $1,87\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1} \cdot \text{pessoa}^{-1}$

Fração Orgânica do Resíduo: 51,4%

Sólidos Totais (ST): 21,9%

Sólidos Voláteis (SV): 19,9%

Sólidos Totais Após Diluição (ST_d): 12%

Peso Específico do Resíduo: 1213 kg m^{-3}

5.5.1.1. Cálculo da produção diária total de resíduo

Supondo que cada morador produz em média 1,87 kg de resíduo por dia (COMCAP, 2016), que a fração orgânica do resíduo é de 51,4 % (IBGE, 2010) e que este sistema será projetado para atender 100 pessoas, os cálculos para determinar a produção diária de resíduo no condomínio, em $\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$, pode ser realizados através da Equação i:

$$Pd = \frac{Pu * F * N}{100} \quad (i)$$

Onde:

Pd = Produção diária de resíduo ($kg * dia^{-1}$)

Pu = Produção diária unitária de resíduo ($kg * dia^{-1} * pessoa^{-1}$)

F = Fração orgânica do resíduo (%)

N = População atendida

Realizando-se os cálculos, conclui-se que, diariamente, são gerados 96,12 kg de resíduo orgânico no condomínio hipotético. Este montante será a massa de substrato utilizada para alimentar o tanque digestor todos os dias.

5.5.1.2. Cálculo do volume de água necessário

Para determinação do volume de água necessário para alcançar um substrato com $ST = 12\%$, considerou-se que, originalmente, o substrato possui um teor de sólidos totais de $ST = 21,9\%$ (BROWNE et al., 2013). Portanto, a carga de sólidos totais adicionada diariamente no biodigestor, em $kg * dia^{-1}$ será de:

$$C_{ST} = \frac{Pd * ST_i}{100} \quad (ii)$$

Onde:

C_{st} = Carga de Sólidos Totais adicionada diariamente no biodigestor ($Kg * dia^{-1}$)

Pd = Produção diária de resíduo ($Kg * dia^{-1}$)

ST_i = Fração sólida do substrato inicial (%)

De acordo com estes parâmetros conclui-se que, diariamente, 21,05 kg de sólidos totais são adicionados ao tanque de digestão. Como é necessário que o substrato entre no tanque de digestão com 12% de sólidos totais diluídos, a massa total de alimentação diária (carga de sólidos totais + água para diluição) deve ser de:

$$Mt = \frac{C_{st} * 100}{ST_f} \quad (\text{iii})$$

Onde:

Mt = Massa total de alimentação diária ($\text{kg} * \text{dia}^{-1}$)

C_{st} = Carga de Sólidos Totais adicionadas diariamente no biodigestor ($\text{kg} * \text{dia}^{-1}$)

ST_f = Fração sólida do substrato final (%)

Dessa forma, devem ser adicionados ao tanque de digestão 175,42 kg de resíduo por dia. Como deste montante 96,12 kg são resíduos orgânicos, e considerando o peso específico da água = 1 kg/m^3 , o volume de água final a ser adicionado ao tanque de digestão é calculado de acordo com a equação 3:

$$V_a = (M_t * P_d) * \rho_{\text{água}} \quad (\text{iv})$$

Onde:

V_a = Volume de água necessário (m^3)

M_t = Massa total de alimentação diária ($\text{kg} * \text{dia}^{-1}$)

P_d = Produção diária de resíduo ($\text{kg} * \text{dia}^{-1}$)

$\rho_{\text{água}}$ = massa específica da água ($\text{kg} * \text{m}^3$)

Desta forma, para os 96,12 kg de resíduos orgânicos gerados diariamente, são necessários 0,070 m^3 (70 L) de água para que o substrato entre no digestor com um teor de $ST = 12\%$.

5.5.1.3. Cálculo do volume do tanque digestor

Adotando a massa específica do resíduo orgânico como sendo 1213 $\text{kg} * \text{m}^{-3}$ (SILTA et al, 2010) e um tempo de detenção hidráulica (TDH) de 36 dias, o volume do tanque digestor é definido segunda a equação 5:

$$V_{digestor} = \left((P_d * \rho_{resíduo}) + V_{água} \right) * TDH \quad (v)$$

Onde:

V_d = Volume do tanque digestor (m^3)

P_d = Produção diária de resíduo ($kg * dia^{-1}$)

$V_{água}$ = Volume de água necessário (m^3)

$\rho_{resíduo}$ = Massa específica do resíduo ($kg * m^{-3}$)

TDH = Tempo de retenção hidráulica

Após os cálculos, observou-se que é necessário um tanque de digestão com volume igual a $5,71 m^3$ para armazenar o resíduo gerado mais os 70 L de água que devem ser adicionados diariamente. Para fins de segurança, será adotado um tanque digestor de $6m^3$ de volume. Para tal, a semiesfera deve possuir 1,42 m de raio. A câmara interna do tanque de digestão deve ter capacidade para armazenar $3 m^3$ de resíduo e terá 1m de altura e 1m de diâmetro.

5.5.1.4. Produção diária de biogás

Para calcular a produção diária de biogás, assumiu-se que 1 kg de resíduo é capaz de gerar $0,1 m^3$ de biogás. Portanto, para 96,12 kg de resíduo adicionado, estima-se que sejam produzidos $9,61 m^3$ de biogás por dia.

$$G = P_d * 0,1 \quad (vi)$$

Onde:

G = Produção diária de biogás ($m^3 * dia^{-1}$)

P_d = Produção diária de resíduo ($kg * dia^{-1}$)

5.5.1.5. Consumo diário de biogás

De acordo com informações fornecidas no manual da BGS equipamentos para biogás, um fogão tipo Cooktop possui uma taxa de consumo de $0,450 m^3/hora$ de biogás por queimador (Figura 17).

Figura 17: Fogão tipo Cooktop a biogás



CARACTERÍSTICAS

Gás adequado: Biogás
Potência calorífica: 2,8 kW
Taxa de consumo de gás: 0,45 m³/h (por queimador)
Eficiência térmica: > 57%
Pressão de entrada do gás: 1,6 kPa
Eficiência do acendedor: > 98%

Fonte: BGS equipamentos para biogás

A mesma empresa também fornece lamparinas com iluminação similar a uma lâmpada incandescente de 60-100 W. Estas lâmpadas possuem um consumo de gás de 0,070 m³/hora de biogás (Figura 18).

Figura 18: Lamparina com queimador a biogás



CARACTERÍSTICAS

A iluminação similar a uma lâmpada incandescente de 60-100 W.
Consumo de gás: 0,07 m³/h.

Fonte: BGS equipamentos para biogás

Supondo que o biogás gerado neste sistema possa ter duas finalidades diferentes, de acordo com as possibilidades de cada instalação, observa-se que, com o volume de biogás produzido diariamente, é possível: manter a chama de um queimador acesa, 3 horas por dia, em todas as 24 residências deste condomínio ou, manter 17 lâmpadas acesas, 8 horas por dia, todos os dias. A tabela 3 traz o consumo total de gás nas duas situações propostas.

Tabela 3: Consumo diário de biogás considerando os dois cenários propostos

Finalidade	Consumo de gás (m³/h)	Unidades	Tempo (horas)	Consumo total (m³/dia)
<i>Fogão tipo Cooktop</i>	0,45	24	3	8,64
<i>Lâmpada com Queimador</i>	0,07	17	8	9,52

Vale ressaltar que inúmeras possibilidades podem ser compostas para a utilização do biogás gerado. Por exemplo, pode-se utilizar o biogás para queima em fogões de funcionários e salões de festas quando houver necessidade, e para iluminação dos jardins diariamente. A escolha da aplicação mais adequada dependerá das necessidades de cada condomínio.

5.6. COMPONENTES DO BIODIGESTOR

5.6.1. Câmara de entrada

A câmara de entrada é um recipiente que tem como finalidade o recebimento do substrato e seu armazenamento provisório, proporcionando assim sua pré-fermentação. É nela que o substrato será diluído e triturado antes de ser introduzido na câmara de digestão. No caso deste projeto pretende-se alcançar o teor de sólidos totais (ST) de 12% por meio da adição de água.

A câmara de entrada foi projetada para o tempo de detenção de um dia. O reator foi projetado para receber por volta de 0,080 m³ (o que corresponde a 96,2 kg de resíduos sólidos orgânicos) mais em torno de 0,070 m³ de água por dia, logo a câmara de alimentação deve ser capaz de armazenar aproximadamente 0,16 m³.

Esta câmara será coberta para proteger o triturador das intempéries, mas estará sujeita a pressão atmosférica por meio de furos localizados na sua lateral. O reator foi projetado para operar na pressão de 5 c.c.a., ou seja a diferença entre os níveis da câmara de digestão e da câmara de entrada será de 5 c.c.a..

5.6.2. Triturador

O sistema de trituração estará acoplado na câmara de entrada e funcionará como tratamento preliminar do substrato. Como já discutido anteriormente, a trituração do resíduo facilita a homogeneização e aumenta a eficiência do biodigestor.

O triturador adotado consiste em um modelo semelhante ao exposto na figura 19. Este modelo possui potência de 0,75 HP, carga média de 405 W e funciona a 1425 rpm. A alimentação elétrica deste equipamento poderá ser realizada por painéis fotovoltaicos, tornando o Projeto ainda mais sustentável.

Figura 19: Triturador de Alimentos



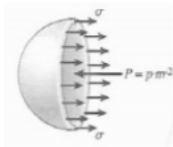
Fonte: Manual Insinkerator, disponível em <http://www.insinkerator.com.br/>, acessado em 04/07/2016

5.6.3. Câmara de Digestão

Neste projeto optou-se por um biodigestor em configuração de uma esfera apoiada sobre o solo, superficial, sendo a câmara de digestão constituída pela semiesfera inferior e a câmara de biogás a semiesfera superior. Esta forma foi escolhida por ser uma estrutura otimizada, apresentando menor superfície específica por unidade de volume armazenado, proporcionando também uma menor área de envoltório – e consequentemente menor área de troca de calor com a atmosfera.

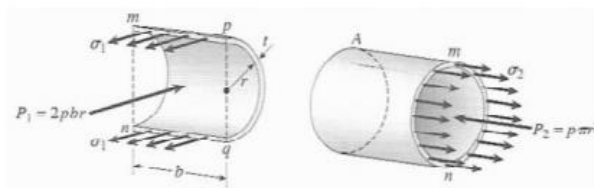
Outro ponto interessante é que o tanque esférico necessita de metade da espessura de um tanque cilíndrico para suportar as mesmas pressões internas, como pode-se notar comparando-se as Figuras 20 e 21. Assim, esta geometria esférica possibilita a economia de material tornando o equipamento mais leve e mais fácil de ser instalado.

Figura 20: Tensão em um vaso esférico de parede fina



Fonte: GERE (2001)

Figura 21: Tensão em um vaso cilíndrico de parede fina



Fonte: GERE (2001)

Os tanques esféricos são muito empregados, principalmente para armazenamento de gases sob alta pressão em refinarias de petróleo. Por não apresentar vértice, as tensões na parede de uma esfera são mais equilibradas em todos os eixos. Isso faz com que não existam pontos de concentração de tensão reduzindo as chances de fraturas da estrutura.

Após passar pela câmara de entrada e ser triturado, o resíduo será encaminhado para a câmara de digestão. Essa câmara será uma semi-esfera, composta por dois compartimentos, aqui chamadas de compartimento externo e compartimento interno, que promoverão a digestão do resíduo em duas fases.

A fase de hidrólise e acidogênese serão realizadas preferencialmente no compartimento externo. O efluente será inserido em um ponto da câmara digestora e percorrerá toda a extensão do compartimento externo até um vertedouro localizado na parede do compartimento interno. À medida que o substrato é adicionado ao digestor, o material já digerido é deslocado em direção ao vertedouro para então ser depositado no compartimento interno, onde ocorrerá preferencialmente a fase metanogênica da digestão.

Estudos realizados por Kumar et al. (2005) mostraram que a cor do reator influencia, exercendo um importante papel na absorção de luz e transferência de calor para o substrato, aumentando significativamente a eficiência do biodigestor e a qualidade o biogás produzido (maior teor

de metano). Por isso, decidiu-se que o reator terá cores escuras, como o verde escuro, de forma a melhorar a absorção de energia e aumentar transferência de calor para o substrato.

Outro ponto considerado importante é garantir que o material escolhido para o tanque digestor seja estanque, possua boa resistência química, seja leve, não biodegradável e seja de baixo custo. Por este motivo, o material escolhido para o tanque digestor foi o Polietileno de Alta Densidade PEAD (*High Density Polythylene* – HDPE).

O PEAD é um material de alta resistência química e mecânica devido à orientação das suas cadeias poliméricas que, por aumentar o empacotamento dessas cadeias, aumenta a rigidez deste polímero. De acordo com Miles e Briston (1965), o PEAD possui baixa reatividade química sendo estável em soluções alcalinas e salinas de qualquer concentração, independente do pH. Em temperaturas ambientes, o PEAD não é solúvel em nenhum solvente e o material é relativamente resistente ao calor. Este polímero possui uma vasta aplicabilidade dependendo do processo de moldagem, que pode ser por sopro, extrusão ou injeção. Destaca-se a utilização deste material para a confecção de embalagens, baldes, tanques, tambores, tubulação para saneamento, distribuição de gás e etc, que podem inclusive ser reciclados. Atualmente, já está sendo explorada no Brasil a produção de PEAD do tipo grade, moldado por sopro, para a manufatura de tanques de combustível e contêineres (RETO, 2000).

O corpo do reator será composto por três peças encaixáveis. A primeira peça será uma semiesfera e funcionará como câmara externa do tanque de digestão. A segunda peça será cilíndrica e corresponderá a repartição interna do reator, formando o compartimento interno. Por fim, a terceira peça, será outra semiesfera que cobrirá a parte superior do reator e será fixa a primeira semiesfera por um sistema de flanges. Esta última tem como função proteger a geomembrana da câmara de biogás de intempéries, prolongando assim a vida útil destas estruturas.

5.6.4. Sistema de vedação

O sistema de vedação entre as câmaras de digestão e de biogás será enrijecido por um perfil chato de alumínio, calandrado, com cantos arredondados, fixado as flanges das duas semi-esferas com parafusos de aço galvanizado, que deverão ter suas extremidades protegidas por “caps” de material plástico que facilitarão a instalação e protegerão estes materiais da agressividade do meio.. A vedação entre estes componentes será realizada com uma resina a base de poliuretano (PU).

As flanges entre as tubulações de gás, descarga de fundo e retirada de biofertilizante serão em PVC, pintadas da mesma cor do corpo do reator, com tinta a base de água. A Figura 22 mostra a foto de um conjunto de porcas e parafusos que possuem proteções plásticas contra intempéries.

Figura 22: Parafusos e porcas que possuem proteção plástica contra intempéries



Fonte: Arquivo pessoal

5.6.5. Agitadores

Para assegurar a agitação do substrato, evitar a sua estratificação e garantir o fluxo de efluentes, dois agitadores axiais estarão acoplados à câmara de digestão.

Os agitadores serão confeccionados em Aço Inoxidável 316 e serão acionados manualmente por volantes localizados na parte externa da câmara de digestão. Para facilitar o escoamento do substrato no compartimento externo, os agitadores serão posicionados de forma a possibilitarem o escoamento pistonado, *plug flow*. Sendo assim, o sistema de agitação facilitará que o substrato adicionado no início do processo percorra toda a extensão da câmara externa e seja encaminhado em direção ao vertedouro para então seguir o processo na câmara interna do reator.

Figura 23: Hélice do sistema de agitação manual para fluxo axial



Fonte: <http://www.directindustry.com/> , acessado em 04/07/2016.

5.6.6. Descarga de Fundo

A descarga de fundo, tanto da câmara interna, quanto da câmara externa se dará por tubulações flexíveis acopladas respectivamente na parte inferior do compartimento interno e na lateral do compartimento externo da câmara de digestão. As tubulações terão diâmetro nominal de 100 mm e serão em PVC e, assim como as outras tubulações, as tubulações de descarga de fundo serão acopladas a câmara de digestão por um flange de PVC

Figura 24: Mangueira Sanfonada em PVC para descarga de fundo



Fonte: <http://www.rubberfast.com.br>, acessado em 04/07/2016

Estima-se que a descarga de fundo da câmara externa deva ser feita a cada 30 dias evitando a colmatção do equipamento. O material retirado pode ser utilizado como fertilizante, pois possui elevada carga de nutrientes (Fósforo e Nitrogênio).

A tubulação de descarga de fundo da câmara interna estará ligada à tubulação de esgoto do condomínio residencial. Alternativamente, dependendo da disponibilidade de espaço e da demanda de biofertilizante o digestato pode ser aplicado em solos agricultáveis, parques e jardins.

5.6.7. Tubulações de gás

A tubulação de gás será acoplada na parte superior da câmara de digestão. Para garantir a estanqueidade, a tubulação entrará no tanque ainda na fase líquida do substrato e se estenderá até a fase gasosa.

Canalizações para transporte de biogás em PEAD são consideradas apropriadas por possuírem adequada resistência mecânica, química e térmica. Entretanto, é necessária precaução contra possíveis incêndios empregando tubos condutores com resistência elétrica até $10^9 \Omega$. Neste trabalho, todas as tubulações de gás terão diâmetro nominal de 1". Uma Válvula de Esfera de PVC com diâmetro nominal de 1" será instalado na tubulação de saída de gás para controle de vazão.

Figura 25: Tubulação de gás em PEAD, DN = 1"



Fonte: <http://www.solucoesindustriais.com.br/>, acessado em 04/07/2016

Por ser uma tubulação plástica, o PEAD possui baixa estabilidade estrutural sendo importante realizar a instalação de um modo que evite curvas e pontos de acúmulo de água condensada. Para isso, é necessário considerar o coeficiente de expansão térmica da tubulação de 0,20mm/m.K, principalmente nos casos em que a tubulação não é enterrada e é exposta a variações de temperatura.

Figura 26: Conexões para Tubulação de gás em PEAD, DN = 1"



Fonte: <http://www.solucoesindustriais.com.br/>, acessado em 04/07/2016

Por fim, os trechos de gasoduto situados a montante dos equipamentos de queima devem possuir todas as válvulas e equipamentos de segurança exigidos pelo Corpo de Bombeiros na Instrução Técnica N° 28/2011. A instrução estabelece que este tipo de tubulação deve ser dotada de válvulas corta-chamas que são capazes de proteger o gasômetro contra chamas que possam vir a se propagar em casos de falhas.

As válvulas corta-chamas podem apresentar falhas de operação caso haja presença de sedimentos ou condensados proveniente dos gases transportados. Por isso, um sistema de purga será instalado na saída da câmara de digestão, realizando a segregação do material condensado das tubulações e garantindo a vida-útil do sistema corta-chamas.

5.6.8. Tubulação de Biofertilizante

Como já citado anteriormente, além da geração de biogás, a digestão anaeróbia também gera como subproduto um biofertilizante líquido, rico em nutrientes. Uma tubulação de PVC de diâmetro nominal de 50 mm fará a retirada da fração líquida do substrato. Por ser rico em bactérias, este líquido será adicionado novamente ao tanque digestor pela câmara de entrada, diminuindo a quantidade de água a ser adicionada ao sistema.

5.6.9. Alimentador de água

Para que o sistema funcione corretamente, o resíduo precisa ser diluído em água até uma concentração de sólidos totais iguais à 12%. De acordo com os cálculos feitos anteriormente, para alcançar esta concentração é necessário adicionar 70L de água por dia no tanque de digestão. Logo, é imprescindível que o biodigestor seja instalado próximo à rede de abastecimento de água.

Para controlar a quantidade de água adicionada, uma mangueira com controle de vazão e temporizador será disponibilizada junto ao sistema. O temporizador emitirá um sinal sonoro a cada 10L de água adicionado, e um sinal sonoro diferenciado ao final dos 70L de água adicionados. É importante que o operador tenha controle sobre a quantidade de água adicionada distribuindo ela igualmente junto ao substrato.

5.6.10. Câmara de biogás

A câmara de biogás escolhida para este sistema é semelhante ao tipo membrana dupla. A semiesfera superior funciona, neste caso, como “membrana externa fixa” e protege a membrana interna das intempéries e radiações UV. A membrana interna, por sua vez, funciona como câmara de biogás propriamente dita armazenando o biogás produzido na câmara de digestão. Sugere-se que esta membrana seja feita de um elastômero chamado *Etileno-Propileno-Dieno* – EPDM que, por ser um material elástico, expande e comprime de acordo com a produção e o consumo do biogás gerando a pressão necessária sendo desnecessária a utilização de gás comprimido ou bombeamento.

Neste sistema, as membranas serão montadas diretamente acima da semiesfera digestora. Todas as tubulações de descarga de fundo e saída de biogás serão instaladas na semiesfera inferior

A exposição à radiação, e o superaquecimento da membrana devido à deposição de partículas finas na superfície da membrana externa pode causar rachaduras e falhas na junção dos gomos da membrana. Por este motivo, ao contrário do tanque digestor, optou-se neste caso por uma membrana de cor clara, que reflita a radiação UV impedindo o superaquecimento da superfície e diminuindo a expansão dos gases armazenados.

Optou-se por utilizar uma camada externa fixa para a câmara de biogás por se tratar de um reator que será instalado em uma área urbana, sujeito, portanto, a vandalismos ou acidentes por acesso indevido de pessoas não autorizadas.

5.7. TABELA DE PRODUTOS E ORÇAMENTO

Para a preparação do orçamento final deste biodigestor, foram consideradas as peças imprescindíveis para a elaboração do sistema. Entretanto, o valor final apresentado é uma estimativa do custo real do empreendimento visto que, não foram incluídas todas as partes integrantes deste biodigestor e que poderão existir imprevistos durante a execução do projeto.

Tabela 4: Orçamento parcial do biodigestor proposto

<i>Item</i>	<i>Material</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Valor Unitário (R\$)</i>	<i>Total (R\$)</i>
<i>Semiesferas</i>	PEAD	2	2000,00	4000,00
<i>Estrutura Câmara de Entrada</i>	Polietileno UV estabilizado	1	1000,00	1000,00
<i>Aagitadores Manuais</i>	Aço Inox 316	2	300,00	600,00
<i>Triturador</i>	Aço	1	800,00	800,00
<i>Cuba para câmara de entrada</i>	Aço inox	1	100,00	100,00
<i>Gasômetro</i>	EPDM	15m ²	50,00	750,00
<i>Tubulação Sanfonada</i>	Aço Inox 316	4m	69,90	271,60
<i>Tubulação de gás</i>	PEAD	2m	27,90	55,80
<i>Válvula de Esfera 1''</i>	PEAD	1	36,00	36,00
<i>Flanges 1''</i>	PVC	1	15,59	15,59
<i>Flanges 4''</i>	PVC	2	15,00	30,00
<i>Vedação</i>	PU	2	25,10	50,20
<i>Mangueira alimentadora de água</i>	-	1	48,90	48,90
<i>Temporizador</i>	-	1	105,00	105,00
<i>Parafusos</i>	Latão*	32	4,20	134,4
<i>Porcas</i>	Latão*	32	2,10	67,2
TOTAL	8.064,69			

*Os parafusos e porcas em latão serão revestidos com capas de material plástico.

5.8. DISCUSSÃO SOBRE GANHOS E INVESTIMENTOS

Hoje, a Centrais Elétricas de Santa Catarina – CELESC, cobra de seus clientes R\$0,33, fora impostos, por kWh consumido. Caso o Biogás fosse utilizado para iluminação, utilizando 17 lâmparinas com energia luminosa correspondente á lâmpadas de 100 kW, o condomínio economizaria aproximadamente R\$ 134,64 por mês na conta de energia.

Da mesma forma, observando que 1 m³ de biogás possui uma equivalência energética de 0,45 kg de Gás Liquefeito de Petróleo – GLP. Considerando que o biodigestor tem capacidade de produzir em torno de 10 m³ de biogás por dia, este biodigestor pode gerar, diariamente, o equivalente a 4,5 kg de GLP ou 135 kg de GLP por mês. Expressando isto em valores, este biodigestor produz o equivalente a R\$550,00 reais em combustível (considerando que um botijão de gás com 13 kg de GLP custa aproximadamente R\$55,00).

Considerando que este projeto não é um produto tecnológico, industrializado, optou-se apenas por estimar os custos de alguns componentes que seriam utilizados na sua fabricação. O desenvolvimento de um produto envolveria a participação de equipes multidisciplinares. Assim, os valores apresentados nesta estimativa de custo são parciais, e indicam apenas que se fosse abatido do custo do equipamento os ganhos obtidos pela valoração do biogás produzido mensalmente, o equipamento poderia ser pago em aproximadamente 2 anos.

Entretanto, existem ainda os lucros oferecidos à prefeitura da cidade de Florianópolis. Sabendo que metade dos resíduos sólidos domésticos gerados na cidade é composta por matéria orgânica, metade do valor investido no atual método de tratamento e disposição final seria economizado, caso fosse incentivado o tratamento dos resíduos sólidos orgânicos localmente, por meio da biodigestão anaeróbia. Este lucro poderia ser repassado aos habitantes da cidade por meio de um desconto na taxa TCRS (Taxa de Coleta de Resíduos Sólidos). Atualmente, esta taxa é cobrada junto ao IPTU, e custa 202,62 reais por ano em locais com coletas de três vezes na semana e 405,24 reais por ano em locais com coletas diárias.

Além dos ganhos convencionais já explicitados, existem ainda os ganhos sociais e ambientais resultantes da implantação desta tecnologia. Como já foi discutido anteriormente, os resíduos sólidos geram problemas sociais em áreas de morros devido à dificuldade de acesso para a coleta pela COMCAP. Este problema faz com que muitas vezes

os resíduos sejam depositados em locais impróprios, atraindo vetores de doenças e gerando a poluição do solo e de mananciais. Por ser uma região turística, a cidade também enfrenta problemas na coleta de resíduos urbanos gerados nas regiões de balneários. Durante o verão, devido aos engarrafamentos constantes nas vias de acesso as praias, o caminhão de coleta leva um tempo maior para cumprir a rota, tornando a operação mais onerosa. A instalação de biodigestores nessas regiões diminuiria a frequência de coleta minimizando os problemas de logística enfrentados. Isso geraria economia de tempo, pessoal e combustíveis fósseis para a empresa.

Em termos ambientais, vale ressaltar que no transporte dos resíduos sólidos orgânicos podem ser gerados líquidos, chamados lixiviados ou chorume. Estes líquidos podem escorrer dos caminhões de coleta causando a contaminação do solo e a emissão de forte odor no percurso. Além disso, ao chegar à estação de transbordo, esses caminhões precisam ser lavados diariamente, fato que consome uma excessiva quantidade de água por dia.

Os resíduos sólidos de Florianópolis são enviados à um aterro sanitário que não realiza o aproveitamento energético do biogás, sendo este gás totalmente queimado. O gás metano é um GEE, portanto sua emissão para a atmosfera deve ser evitada.

De maneira mais abrangente, os benefícios desta tecnologia incluem economias referentes à limpeza de vias públicas, gastos com saúde pública, manutenção de rodovias (menor tráfego de caminhões de coleta), economia de energia, água entre outros.

Ao escolher tratar o resíduo sólido localmente, o indivíduo promove a ideia do cidadão sustentável. Os impactos ambientais causados pelo atual modelo de gerenciamento de resíduos deixam de existir, e, adicionalmente, o resíduo por ele gerado pode ser transformado em energia limpa para seu próprio consumo. Assim, em termos locais e globais, esta iniciativa embora pequena, pode contribuir para uma grande mudança no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos.

Vale ainda ressaltar que esta tecnologia pode ser aplicada não apenas para processamento de resíduos sólidos orgânicos de origem doméstica, residenciais ou condominiais. O equipamento pode também ser aplicado visando o tratamento de resíduos sólidos orgânicos de grandes geradores como: hotéis, shoppings, restaurantes industriais, restaurantes universitários, clubes, hospitais, escolas entre outras inúmeras possibilidades.

É preciso atentar-se a métodos de tratamento de resíduos que aperfeiçoem processos, e aproveitem todo o potencial energético e de matéria prima que os RSU podem oferecer, caso se deseje tratar os resíduos sólidos urbanos de maneira eficiente e sustentável. Os RSU são variados em composição e necessitam de métodos de destinação final diferentes para cada um de seus componentes (resíduos orgânicos, materiais recicláveis, materiais reutilizáveis e rejeitos). Atualmente, os RSU gerados no Brasil são gerenciados de forma inapropriada e ineficiente. A tecnologia de tratamento mais utilizada e difundida no Brasil (aterramento sanitário) não explora os potenciais destes materiais transformando-os em rejeitos sem nenhum valor agregado.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados expostos e discussões levantadas no Capítulo 8 deste trabalho, é possível assegurar que o tratamento e processamento de resíduos sólidos orgânicos, por meio do método de digestão anaeróbia, é uma opção de disposição final vantajosa frente ao atual cenário dos resíduos sólidos urbanos brasileiro. Ao optar por tratar o resíduo localmente, o cidadão evita a geração de passivos ambientais em diversas dimensões e passa a colaborar para o desenvolvimento sustentável, transformando o resíduo por ele gerado em energia renovável para o seu próprio consumo.

No caso hipotético definido por este trabalho, de tratamento dos resíduos sólidos orgânicos de um condomínio residencial, estima-se que os resíduos orgânicos produzidos pelos 100 habitantes deste condomínio sejam capazes de gerar em torno de 9,61 m³ de biogás por dia. Este valor corresponde a um equivalente energético de 4,5 kg de GLP, e é suficiente para manter acesas 24 bocas de fogão durante 3 horas por dia. A destinação final do biogás gerado da digestão destes resíduos – seja para queima ou iluminação – pode ser definida de acordo com as necessidades e singularidades de cada empreendimento. Isto torna a tecnologia flexível, podendo ser adotada em vários cenários.

Ao desenvolver o biodigestor proposto, almejou-se criar um produto economicamente acessível, eficiente, esteticamente atraente e que se adequasse satisfatoriamente as condições climáticas da região de Florianópolis. O levantamento de custos, apresentado no Capítulo 8 deste trabalho, orçou o equipamento em cerca de R\$ 8.000,00. Este valor é relativamente baixo quando comparado ao tempo de retorno do investimento, e menor ainda, quando comparado aos ganhos

econômicos, ambientais e sociais que este tipo de disposição de resíduos pode proporcionar.

Caso este biodigestor fosse implantado em locais de grande geração de RSU, como condomínios residenciais, restaurantes, hospitais e shoppings, uma grande parcela destes resíduos deixaria de ser tratados como rejeitos causadores de passivos ambientais e tornar-se-iam produtos valorizados, capazes de gerar energia e fertilizantes.

Por fim, recomenda-se que estudos semelhantes sejam realizados visando a aplicação deste equipamento para outras finalidades como restaurantes, hotéis, shoppings e etc, com o intuito de conferir a aplicabilidade do biodigestor proposto e disseminar a tecnologia de biodigestores anaeróbios para tratamento de resíduos sólidos orgânicos. Recomenda-se também que o biodigestor seja construído e aplicado em escala real, de modo a conferir os valores de eficiência e produção de biogás, estimados por este trabalho. E ainda, recomenda-se a continuidade deste trabalho visando seu aperfeiçoamento e transformação desta ideia em um produto.

REFERÊNCIAS

ABRELPE Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorana dos resíduos sólidos no Brasil. 2014.

AHRING, BK.; MLADENOVSKA, Z.; IRANPOUR, R.; WESTERMANN, P. State of the art and future perspectives of thermophilic anaerobic digestion. *Water Science Technology*, v. 10, p. 45-293, Mai. 2002.

ANDRADE, M.A.N. Procedimentos para simulação física de reatores anaeróbios de escoamento ascendente e manda de lodo (UASB) visando o estudo de seu comportamento hidrodinâmico. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 1995.

ANGENENT, L.T. Production of bioenergy and biochemical from industrial and agricultural wastewater. *Trends in Biotechnology*, v.22, p.477-485, Set 2004.

ALBURLÚ, I.; LOZANO, J.; REY-MAQUIEIRA, JAVIER.; The challenges of municipal solid waste management systems provided by public-private partnerships in mature tourist destinations: The case of mallorca. *Waste Management*, v. 51, p. 252-258, 2016.

BARR, S. Strategies for sustainability: citizens and responsible environmental behavior. *Area*, v. 35, p. 227-240, Set. 2003.

BRASIL. Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.

BROWN, D.; LI, Y. Solid State anaerobic co-digestion of Yard waste and food waste production. *Biosource Technology*, v.127, p. 275-280, Jan 2013.

CAMPOS, J. R. – “Notas da aula de Tratamento de Águas Residuárias”, Pós Graduação em Hidráulica e Saneamento na Escola de Engenharia de São Paulo. 1998.

CHEN, L.; ZHAO, L.; REN.; WANG, F. The progress and prospects of rural biogas production in China. *Energy Policy*, v. 51, p. 58–63, Dez. 2012.

COMCAP – Companhia de Melhoramentos da Capital. Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos de Florianópolis. 2011.

COMCAP – Companhia de Melhoramentos da Capital. Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos de Florianópolis. 2002.

CORPO DE BOMBEIROS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Instrução Técnica 28/2011 Manipulação, armazenamento, comercialização e utilização de gás liquefeito de petróleo (GLP).

FLORIANÓPOLIS, Lei Complementar Municipal nº 113/2003. Dispõe sobre a forma de apresentação dos resíduos sólidos para a coleta.

FORESTI, E., ZAIAT, M., VALLERO, M. Anaerobic processes as the core technology for sustainable domestic wastewater treatment: Consolidated applications, new trends, perspectives, and challenges, *Reviews in: Environ. Sci. and Bio/Technol.*, v.5: p. 3-19, 2006 (RAJESHWARI et al., 2000)

GARFÍ, M.; FERRER-MARTÍ, L.; PÉREZ, I.; FLOTATS, X.; FERRER, I. Codigestion of cow and guinea pig manure in low-cost tubular digesters at high altitude. *Ecological Engineering*, v. 37, p. 2066–2070, Dez. 2011.

GERE, J. M. In *Mechanics of Materials*. 1972.

HARTMANN, H.; ANGELIDAKI, I.; AHRING, B.K. INCREASE of anaerobic degradation of particulate organic matter in full-scale biogas plants by mechanical maceration. *Water Science Technology*, v. 41, p. 145-53, Fev. 2000.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos. 2012

ITODO, IN.; AGYO, GE.; YUSUF, P. Performance evaluation of a biogas stove for cooking in Nigeria. *Journal of Energy in Southern Africa*, v. 18, p. 14-18, Ago. 2007.

JEWELL, W. J. Low cost methane generation on small farms. *Fuel Gas Production from Biomass*, v. 2. CRC Press, Boca Raton, Florida, 1981.

JEWELL, W.J.; WRIGHT, P.E.; FLESZAR, N.P.; GREEN, G.; SAFINSKI, A.; ZUCKER, A. Evaluation of Anaerobic Digestion Options for Groups of Dairy farms in Upstate New York. Ithaca, NY: Cornell University, Department of Agriculture and Biological Engineering, 1997.

Kumar, R.S.; Sivakumar, T.; Sunderam, R.S.; Gupta, M.; Mazumdar, U.K.; Gomathi, P.; Rajeshwar, Y.; Saravanan, S.; Kumar, M.S.; Muruges, K.; Kumar K.A.; Antioxidant and antimicrobial activities of *Bauhinia racemosa* L. stem bark, *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, v.38, p.10015-1024, 2005.

LETTINGA, G.; VAN VELSEN, A.F.M.; HOBMA, S.W.; ZEEUW, E.; KLAPWIJK, A. Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. *Biotechnology and Bioengineering*, v.22, p. 699-734, Abr 1980.

LETTINGA, G. Anaerobic digestion and wastewater treatment systems. *Antonie van Leeuwenhoek*, v.67, p. 3-28, Fev. 1995.

LETTINGA, G., HULSHOF POL, L. W., ZEEMAN, G. Biological Wastewater Treatment. Parte I: Anaerobic wastewater treatment. *Lecture Notes*. Wageningen Agricultural University, ed. January, 1996.

MARTÍ-HERRERO, J.; CIPRIANO, J. Design methodology for low cost tubular digesters. *Bioresource Technology*, v. 108, p. 21-27, Mar 2012 GUNNERSON et al, 1989

McCARTY, P. L. One hundred years of anaerobic treatment. In: HUGHES D. E.; STAFFORD D. A.; WHEATLEY B. I. (Eds). *Anaerobic digestion*. Amsterdam: Elsevier Biomedical, 1982. p. 3-22.

METCALF e EDDY In: *Waste water engineering: treatment and reuse*. 3 ed., McGraw-Hill, Nova York, 1991.

MOSEY F.E. Mathematical modelling of the anaerobic digestion process: regulatory mechanisms for the formation of short-chain volatile acids from glucose. Water ScienceTechnology V.15, p. 209-232, 1983.

RAJENDRAN, K.; ASLANZADEH, S.; TAHERZADEH, MJ. Household biogas digesters-A review. Energies, v. 5, p. 2911–2942, Mai. 2012.

RAVINDRANATH, N. H.; HALL, D. O. In Biomass, Energy and Environmental: A Developing country perspective from India. 1995.

RETO, M.A.S. Revista Plástico Moderno, p.22, Ago 2000.

SADIA. Programa Suinocultura Sustentável. Informativo Sadia, 2009. Disponível em: http://www.sadia.com.br/imprensa/25_PROGRAMA+SUINOCULTURA+SUSTENTAVEL+SADIA+E+O+PRIMEIRO+DO+SETOR+AGRICOLA+NO+MUNDO+A+OBTER+REGISTRO+NA+ONU. Acesso em 28 de agosto de 2012.

SANDBERG, M.; AHRING, B.K. Anaerobic treatment of fishmeal process wastewater in a UASB reactor at high pH. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 36, p.800-804, Nov. 1991.

SANTOS, M. A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção. 3ed. São Paulo: Hucitec, 1999.

SASSE, L. In: Biogas Plants. 1988

SCOTT S. A., DAVEY M. P., DENNIS J. S., HORST I., HOWE C. J., LEA-SMITH D. J. and SMITH A. G. Biodiesel from algae: Challenges and prospects. Current Opinion in Bio- technology, V.21, P.277-86, 2010.

SILVA, M. C.; SANTOS, G. O. Densidade aparente de resíduos sólidos recém coletados. Anais do V CONNEPI – Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação.

SINGH, KJ.; SOOCH, SS.; Comparative study of economics of different models of family size biogas plants for state of Punjab, India. *Energy Conversion and Management*, v. 45, p. 1329–1341, Jun. 2004.

SPEECE, R. E. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. *Environmental Science Technology*, v.17, p.416-427, 1983.

VAN HAANDEL, A.; LETTINGA, G. Tratamento anaeróbio de esgoto. Um manual para regiões de clima quente.ed. Campina Grande, Brasil: Universidade Federal da Paraíba, 1994.

Wiegel, J. The obligatory anaerobic thermophilic bacteria. Kristjansson JK (ed), *Thermophilic bacteria*. Boca Raton, CRC Press, p 105, 1992.

ZEIKUS, J. G. Chemical and fuel production by anaerobic bacteria. *Annual Review of Microbiology*, v.34, p.423-464, 1980.

ANEXO I – CONFIGURAÇÃO FINAL DO BIODIGESTOR PROPOSTO

Figura 27: Layout final do biodigestor proposto

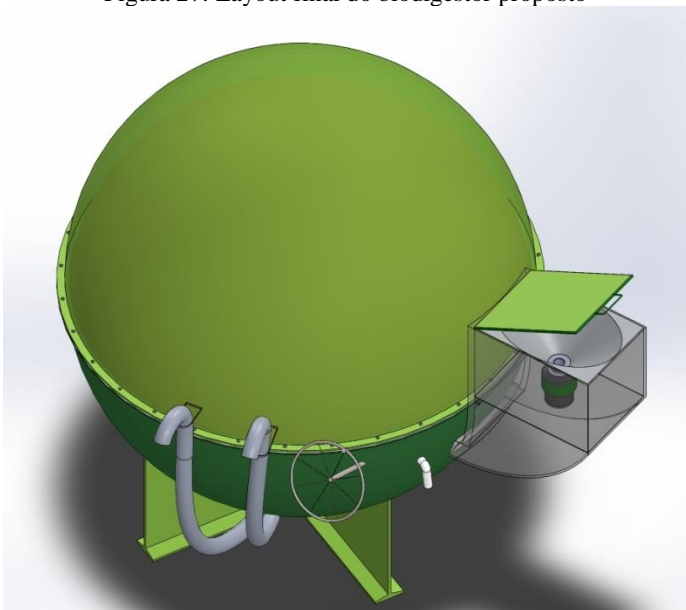


Figura 28: Vista Isométrica com detalhamento da membrana interna (1 – Câmara de entrada; 2 – Membrana externa; 3 – Câmara de gás; 4 – Câmara de digestão; 5 – Base de sustentação)

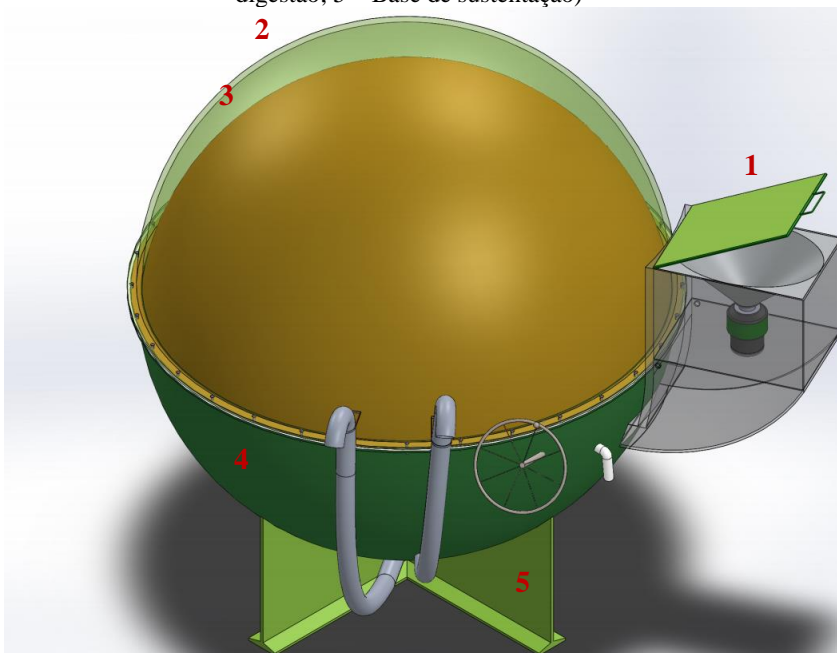


Figura 29: Vista Lateral com detalhamento (1 – Tubulação de saída de gás; 2 – Tubulação de descarga de fundo câmara interna; 3 – Tubulação de descarga de fundo câmara externa; 4 – Tubulação de lixiviados)

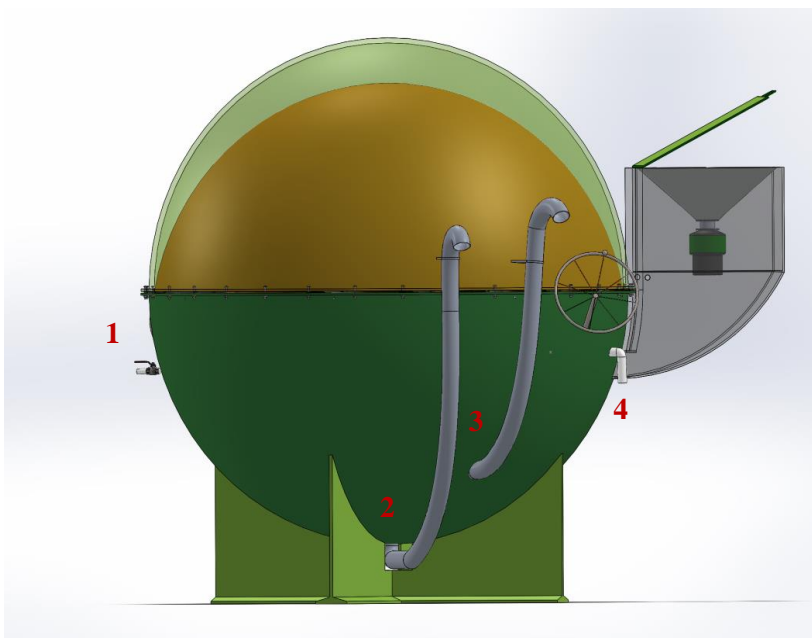


Figura 30: Vista Lateral com detalhamento (1 – Cuba de recebimento; 2 – Triturador)

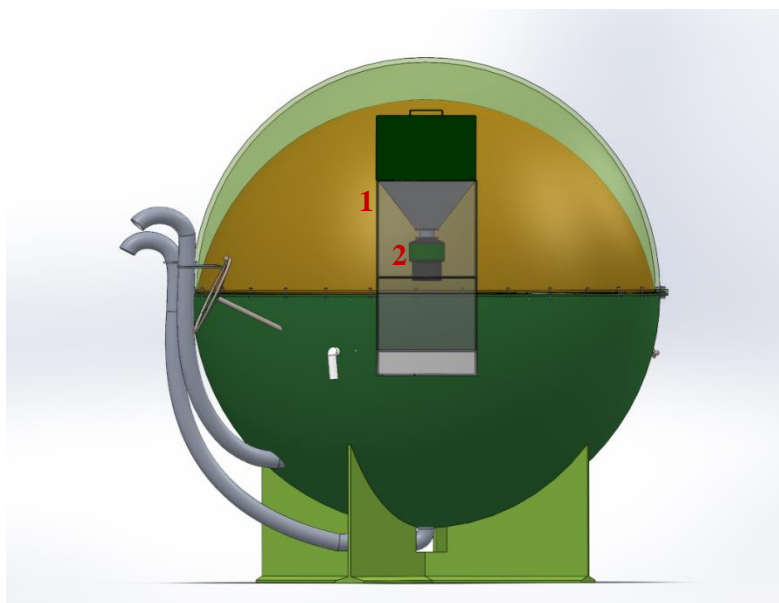


Figura 31: Vista de Topo com detalhamento interno (1 – Agitador axial; 2 – Saída para descarga de fundo da câmara interna; 3 – Saída para descarga de fundo da câmara externa; 4 – Volante dos agitadores manuais)

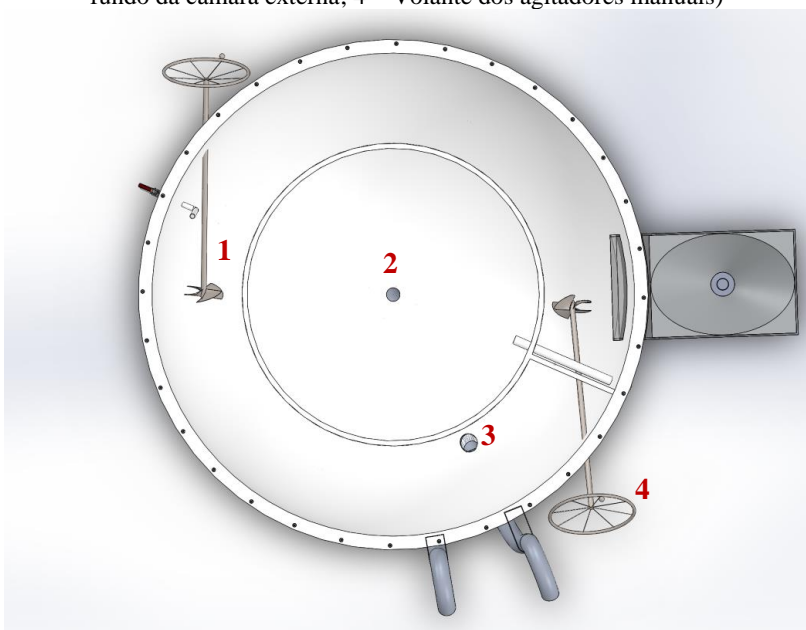


Figura 32: Vista Isométrica do biodigestor sem cobertura (1 - Fitas para retenção da câmara de gás)

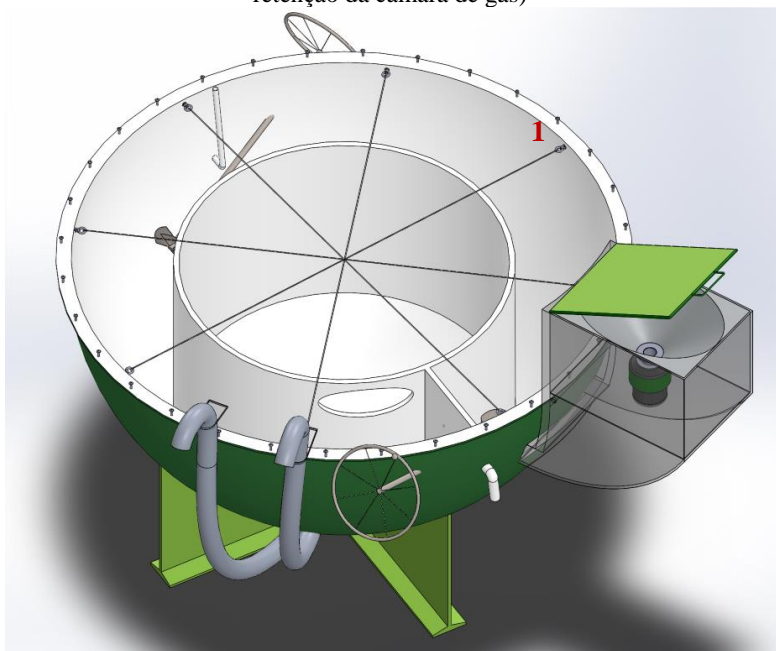


Figura 33: Dimensões do biodigestor ($A = 0,3\text{m}$; $B = 0,9\text{m}$; $C = 0,6\text{m}$; $D = 1,42\text{m}$; $E = 0,83\text{m}$)

